TRAITÉ

DE

PHYSIQUE BIOLOGIQUE

TOME PREMIER

Le Traité de Physique biologique est publié en 3 volumes :

Tome I. — Mécanique. — Actions moléculaires et chaleur.

Tome II. — Radiations. — Optique.

Tome III. — Électricité. — Acoustique.

Chaque volume est vendu séparément.

Le tome I est dès à présent en vente au prix de 25 francs.

On souscrit à l'ouvrage complet au prix de **60** francs ; ce prix restera tel jusqu'à la publication du tome II.

455-98. — Corbeil. Imprimerie Éd. Crété.

TRAITÉ

DE

PHYSIQUE BIOLOGIQUE

PUBLIÉ SOUS LA DIRECTION DE MM.

D'ARSONVAL
Professeur au Collège de France
Membre de l'Institut et de l'Académie de médecine.

GARIEL
Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées
Professeur à la Faculté de médecine de Paris
Membre de l'Académie de médecine.

CHAUVEAU
Professeur au Muséum d'histoire naturelle
Membre de l'Institut et de l'Académie de médecine.

MAREY
Professeur au Collège de France
Membre de l'Institut et de l'Académie de médecine.

SECRÉTAIRE DE LA RÉDACTION

M. WEISS
Ingénieur des Ponts et Chaussées.
Professeur agrégé à la Faculté de médecine de Paris.



TOME PREMIER

PAR MM.

CHARRIN, DASTRE, GARIEL, HALLION, IMBERT, LANGLOIS,
LAULANIÉ, MANGIN, MAREY, MEYER,
PORTIER, REGNARD, RICHER, SIGALAS, TISSOT, WEISS, WERTHEIMER.

PARIS
MASSON ET Cie, ÉDITEURS
LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, 120

1901

PRÉFACE

Au moment où, dans les Facultés de médecine, il s'est produit un changement considérable dans l'enseignement de la Physique, il a semblé utile de réunir en un ouvrage tous les matériaux qui pouvaient faire le fond de cet enseignement.

Déjà les maîtres qui ont pour ainsi dire fondé la Physique biologique, les Weber, Helmholtz, du Bois-Reymond, Chauveau, Marey, Paul Bert, d'autres encore, ont écrit sur certains points spéciaux des traités importants. — Mais si l'on en excepte les manuels et les traités élémentaires à l'usage des étudiants, il n'a encore paru aucun ouvrage d'ensemble sur la Physique biologique. — Il y avait là, semble-t-il, une lacune à combler.

Une seule personne pouvait difficilement accomplir un pareil travail dans un espace de temps relativement restreint. — La rédaction de certains sujets nécessite, en effet, la lecture de documents extrêmement nombreux, et c'est seulement en se divisant la besogne que l'on pouvait espérer faire paraître ce traité assez rapidement pour que les diverses parties qui le composent soient toutes au courant de la science au moment de sa publication. Aussi avons-nous eu recours à de nombreux collaborateurs. La rédaction de chaque partie a été confiée au savant qui, par la nature de ses travaux ou de ses publications, semblait le plus qualifié pour la traiter.

La Physique pure ne tient dans cet ouvrage qu'une place excessivement réduite. — Sa lecture exige la connaissance des notions générales ; toutefois, il a paru nécessaire de faire précéder chaque partie d'une sorte d'aide-mémoire rappelant brièvement les principaux faits sur lesquels il pouvait être nécessaire de s'appuyer dans la suite.

Peut-être, en parcourant ce livre, le lecteur pensera-t-il que certains articles sont hors de proportion par rapport à d'autres; cela tient à diverses causes. — Chaque auteur a une tendance plus ou moins accusée à entrer dans le détail des questions ou à n'en tracer que les grandes lignes. — De plus, il est bon d'insister plus longuement sur les questions nouvelles ou ayant pris à notre époque une importance particulière, et qu'il est parfois difficile de trouver ailleurs réunies en un corps de doctrine. Une rédaction trop brève n'aurait quelquefois pas permis au lecteur de combler certaines lacunes ou de saisir tous les détails du sujet. Certains chapitres du premier volume, au contraire, ont été écourtés pour éviter des répétitions les sujets qui y sont traités ayant des points communs avec d'autres parties de la Physique qui font l'objet d'autres volumes.

L'ouvrage complet comprendra en effet trois volumes.

Nous avons cru devoir placer en tête du premier un court article sur les diverses espèces d'erreur que l'on est exposé à commettre dans les sciences expérimentales, car nous avons remarqué trop souvent que beaucoup de physiologistes ne faisaient pas la distinction convenable entre elles. Toute détermination expérimentale est entachée d'une erreur, et le résultat acquis ne peut être considéré comme ayant quelque valeur que lorsque les limites et la nature de cette erreur ont été bien établies. C'est pourquoi ce début nous a paru indispensable.

Contrairement à notre principe de passer rapidement sur les questions de Physique pure, nous avons aussi donné quelque développement à la Mécanique et aux actions moléculaires. Il est, en effet, souvent difficile pour le physiologiste de lire des traités de Mécanique générale, et nous avons cherché à en exposer les notions les plus indispensables en éliminant autant que possible les formules mathématiques.

Dans ce même volume, se trouve tout ce qui a rapport à la Mécanique animale, à la Chaleur et aux actions moléculaires; cependant, une grande partie des phénomènes de la contraction musculaire a été renvoyée au troisième volume qui contient l'Électro-physiologie.

Ce premier volume sera suivi prochainement, nous l'espérons, par un deuxième volume contenant toutes les applications de l'Optique géométrique et des Radiations.

Enfin le troisième volume est réservé à l'Électricité et à l'Acoustique.

Nous avons fait tous nos efforts pour mener cet ouvrage à bonne fin ; il nous semble avoir réuni pour cela les meilleures conditions : il suffit pour s'en convaincre de lire la table des noms de nos collaborateurs et de se rappeler celui de notre éditeur dont l'éloge n'est plus à faire ; puissions-nous avoir fait œuvre utile.

TRAITÉ

DE

PHYSIQUE BIOLOGIQUE

DES ERREURS DANS LES MESURES

Par G. WEISS.

On peut dire que toutes les sciences passent dans leur évolution par quatre périodes :

1° On observe certains phénomènes ;

2° On cherche à les reproduire, à déterminer les conditions de leur existence, à les varier ; on fait des expériences ;

3° On fait des mesures et on cherche à établir des lois ;

4° On est arrivé à un petit nombre de principes d'où l'on peut déduire par le raisonnement tous les phénomènes observés.

Toutes les sciences ne franchissent pas ces diverses étapes avec la même vitesse; parfois même elles y passent si rapidement qu'elles semblent faire exception à cette règle; d'autres fois elles ont beaucoup de peine à se dégager d'une période pour entrer dans la suivante ou parfois deux périodes se fusionnent en une seule.

Les sciences mathématiques sont arrivées à la quatrième période, la mécanique et l'astronomie viennent de franchir leur dernière étape, les sciences physiques et chimiques sont par parties dans la deuxième et la troisième période; quant aux sciences biologiques, elles viennent à peine de sortir de la première. Pour les sciences expérimentales, le passage le plus long, le plus difficile, est celui de la deuxième à la troisième période; c'est là que l'on se heurte à la science difficile des expériences délicates et des mesures.

L'exécution de bonnes mesures exige de grandes qualités d'expérimentateur et une longue pratique du laboratoire. Parmi les difficultés auxquelles on se heurte, il en est un grand nombre qu'aucun enseignement théorique ne permettra jamais de surmonter, mais il y a un point des plus importants qu'il est possible de traiter dans un livre, c'est celui de l'étude des erreurs ; c'est cette étude que je veux brièvement exposer ici.

Toute détermination expérimentale comporte une erreur. Quelle que soit la

précision des méthodes employées pour exécuter une mesure, on n'obtient jamais la valeur exacte de la grandeur sur laquelle elle a été faite.

Les opérations de géodésie et d'astronomie qui peuvent, dans l'état actuel de la science, être considérées comme les plus parfaites, ne permettent pas de déterminer exactement la valeur des longueurs ou des angles.

Dans l'étude des corps non organisés, l'approximation des mesures peut généralement être poussée très loin ; il n'en est plus de même dans les sciences biologiques, pour des raisons que nous exposerons plus loin.

Il ne s'ensuit pas que l'on ne puisse faire de très bonnes expériences en physiologie : les sciences naturelles et les sciences mathématiques ou physiques ne comportent pas et n'exigent pas la même approximation ; on ne doit pas confondre « bonne expérience » avec « expérience très précise ».

Avant toute chose, il faut, dans une série d'expériences, opérer autant que possible la séparation des variables. Pour faire comprendre cela, je vais prendre un exemple. Supposons qu'un expérimentateur cherche à déterminer la loi de variation de volume des gaz ; on sait que le volume d'un gaz dépend de sa température et de sa pression. L'expérimentateur pourrait faire avec une grande habileté et une extrême précision un nombre considérable de déterminations de volumes gazeux ; s'il avait l'imprudence de faire varier simultanément la pression et la température, il lui serait impossible de tirer une conclusion de ses chiffres et de formuler une loi. Au contraire, un autre expérimentateur, avec des moyens expérimentaux beaucoup moins parfaits, mais qui ferait une première série de déterminations en maintenant la température constante et ferait varier la pression seule, trouverait infailliblement la loi de Mariotte. Puis, faisant varier la température avec une pression constante, il arriverait à la loi de Gay-Lussac. D'une façon générale, on ne peut tirer de conclusion d'une détermination expérimentale que lorsqu'une seule des quantités dont dépend la grandeur que l'on étudie varie. Mais il peut arriver qu'une ou plusieurs des variables échappent à notre action ; par exemple, conservons le cas simple d'un expérimentateur qui chercherait à déterminer la loi de variation des gaz avec la température, sans connaître la loi de Mariotte. Cet expérimentateur serait fort embarrassé, les variations barométriques lui apporteraient sans cesse des causes d'erreurs dont il ne pourrait se préserver. Dans ces conditions, il ne trouverait pas la loi de dilatation des gaz précise que nous connaissons, mais il aurait cependant une règle approximative lui faisant voir que les gaz se dilatent avec la chaleur ; peut-être même quelques observations faites dans des conditions particulièrement favorables lui donneraient-elles une valeur approximative du coefficient de dilatation, et, sans s'être livré à des expériences de précision, il pourrait cependant, dans l'état de sa science, avoir fait des expériences bonnes et utiles. Le biologiste se trouve actuellement dans le cas de cet expérimentateur. Lorsqu'il opère sur la matière vivante, il y a une foule de variables dont il ne peut disposer et que même, pour la plupart, il ne connaît pas. Aussi serait-il antiscientifique de sa part de vouloir employer les méthodes de haute précision : ses résultats n'en seraient pas moins entachés d'erreurs dont il lui est impossible de se défaire. Cependant, il peut, dans une certaine mesure, diminuer l'influence des variables

inconnues. Reprenons encore l'exemple de la dilatation des gaz. Supposons que notre expérimentateur veuille connaître le volume de son gaz à 0° et à 100° à la même pression, ne connaissant pas la loi de Mariotte. La pression barométrique variant au lieu où il se trouve, il fera un grand nombre de déterminations de volumes du gaz à 0°, puis il fera la moyenne de tous les chiffres obtenus. Il aura de cette façon une valeur qui se rapprochera beaucoup de celle qui exprime le volume du gaz à la pression moyenne du lieu où il se trouve. Puis il fera la même opération à 100° et déduira de là une valeur très acceptable du coefficient de dilatation. De même en biologie, si l'on fait un grand nombre de déterminations, en prenant la moyenne des résultats obtenus on a la valeur de la grandeur que l'on étudie dans ce que l'on peut appeler un cas moyen, et l'on saura que cette valeur peut subir certains écarts dans d'autres circonstances parfois inconnues.

Il ne faudrait pas conclure de là que les erreurs commises dans ce genre d'expériences n'ait plus aucune importance, qu'il n'y a pas lieu de s'en préoccuper pourvu que l'on fasse un nombre suffisant d'expériences et que l'on prenne des moyennes. C'est ici qu'intervient la notion de bonne expérience.

En premier lieu, il y a une distinction très importante à faire dans les erreurs : il y a les erreurs *systématiques* et les erreurs *accidentelles*.

Les *erreurs systématiques* sont celles qui, par suite d'un défaut de méthode ou un vice d'appareil, ont une valeur et un sens constants. Par exemple, supposons que, dans une série de mesures de longueurs, on se serve d'un mètre ayant subi une dégradation, dont, pour fixer les idées, le premier centimètre ait disparu. Il est certain que, quel que soit le soin que nous apportions dans les mesures successives, chacune d'elles sera entachée d'une erreur, les chiffres trouvés auront tous 1 centimètre de trop peu. On conçoit alors qu'en prenant la moyenne de tous les résultats trouvés, cette moyenne sera par défaut de 1 centimètre, quelle que soit la précision de la méthode employée pour faire les mesures. Nous résumons ces faits en disant qu'une erreur systématique se conserve dans tous les résultats et ne s'élimine pas par la méthode des moyennes.

Dans le cas que j'ai considéré, le fait est grossier et apparaît à première vue ; mais que de fois, dans des expériences plus délicates, l'erreur est-elle masquée et n'apparaît que par une discussion minutieuse des dispositifs expérimentaux.

Prenons encore un exemple. Lorsque l'on fait des mesures de résistance électrique de liquides, si l'on prend le contact dans le liquide à l'aide d'électrodes métalliques, il se produit une polarisation de ces électrodes. Cette polarisation produit le même effet qu'une résistance parasite ajoutée à la résistance à mesurer, elle introduit par conséquent une erreur systématique ; l'on aura beau opérer avec soin et multiplier les expériences, la moyenne des résultats obtenus sera entachée de cette erreur systématique.

Je ne saurais trop le répéter, l'erreur systématique est la grande pierre d'achoppement des bonnes expériences ; il est rare qu'après les premiers essais d'une série de recherches, on ne soit obligé de modifier les dispositions expérimentales, une critique soignée démontrant la présence d'erreurs systématiques. Celui qui les laisse passer ne peut pas obtenir de résultats conve-

nables, c'est un mauvais expérimentateur, quelle que soit la science dont il s'occupe.

Il en est tout autrement des *erreurs accidentelles*. J'ai dit qu'en employant une bonne méthode et en se servant d'appareils excellents, on ne pouvait cependant prétendre arriver à des mesures parfaites, on n'obtient jamais la valeur absolument exacte de la grandeur sur laquelle on opère. Cela tient en grande partie à ce qu'à un moment donné de l'expérience il faut s'en rapporter à nos sens. Dans une mesure de longueur, par exemple, nous serons obligés de constater la coïncidence de deux traits sur des règles graduées ; or, s'il n'y a qu'une position correspondant mathématiquement à cette coïncidence, il y en a d'autres trop voisines pour qu'un aussi faible écart puisse être apprécié par nos yeux. Au moment où nous supposerons que la coïncidence existe, nous commettrons donc une erreur. Mais cette erreur a un caractère tout différent de l'erreur systématique, il n'y a aucune raison pour qu'elle soit par défaut ou par excès, c'est-à-dire que, dans l'exemple précédent, on lira soit une longueur trop grande, soit une longueur trop petite. Si l'on fait un grand nombre de mesures, tous les nombres trouvés seront entachés d'une erreur, faible en général, mais on aura tantôt des erreurs positives, tantôt des erreurs négatives. Lorsqu'on additionnera tous les résultats pour en faire la moyenne, l'erreur obtenue sur la somme sera égale à la somme des erreurs positives moins la somme des erreurs négatives et, en divisant par le nombre des observations, on aura sur la moyenne une erreur beaucoup plus petite que sur une observation prise isolément. L'expérience et le calcul des probabilités font voir que plus on fait d'observations, plus on diminue l'erreur sur le résultat définitif obtenu par la moyenne des résultats partiels. On voit donc combien la méthode des moyennes est précieuse, surtout dans une science où l'on n'a aucune action sur un certain nombre de variables ; mais il ne faut pas perdre de vue que l'on n'élimine ainsi que les erreurs accidentelles, c'est-à-dire celles que l'on commet même avec de bonnes observations, et que les erreurs systématiques dues à un défaut de technique sont conservées avec toute leur valeur.

Il y a une erreur systématique particulièrement curieuse et importante dans les sciences de haute précision, c'est l'erreur *personnelle*. L'*erreur personnelle* est une erreur due au manque de perfection de nos sens ; on peut l'étudier et en tenir compte dans certains cas. Par exemple, chaque astronome sait, quand il note le passage d'un astre au réticule de sa lunette, qu'il y a entre le moment réel du passage et celui qu'il a déterminé un écart, toujours le même, variable d'un observateur à l'autre, et qui est son erreur personnelle. Je n'insiste pas sur ce genre d'erreur qui n'a aucune application intéressante dans les sciences biologiques.

Il y a aussi lieu de considérer les erreurs suivant qu'elles sont absolues ou relatives ; cette distinction est capitale. Pour fixer les idées, gardons toujours l'exemple des mesures de longueur. Supposons que la méthode de mesure que nous employons nous permette de déterminer la valeur d'une longueur avec un écart de 1 millimètre, on dira que 1 millimètre est l'erreur absolue. Mais il nous arrivera de mesurer des longueurs plus ou moins grandes, par exem-

ple 1 centimètre, 1 décimètre et 1 mètre. Sur ces trois mesures, l'erreur absolue sera la même, 1 millimètre. Mais sur la première de ces grandeurs, l'erreur sera la dixième partie de la grandeur totale, on dira que l'erreur relative est $\frac{1}{10}$, sur la seconde l'erreur relative sera $\frac{1}{100}$ et sur la troisième $\frac{1}{1000}$. On conçoit aisément que cette dernière longueur peut être considérée comme connue avec plus de précision que la deuxième et surtout que la première.

Ce n'est pas l'erreur absolue qui est importante, c'est l'erreur relative qui donne une idée de la qualité de la mesure. Si l'on fait une erreur d'un dixième de millimètre sur le diamètre d'une cellule, l'erreur absolue sera faible, mais l'erreur relative énorme, la mesure n'aura aucune valeur ; si, au contraire, on connaît la distance de Paris à Marseille à une dizaine de mètres près, l'erreur absolue sera incomparablement plus grande que dans le cas précédent, mais l'erreur relative sera insignifiante et la distance trouvée admirablement déterminée.

Il faut avoir soin, lorsqu'on veut comparer entre elles diverses grandeurs et lorsqu'il s'agit de les combiner par les opérations de l'arithmétique, de déterminer toutes ces grandeurs avec la même erreur relative, car le résultat est toujours entaché de l'erreur relative la plus grande. Supposons que l'on combine plusieurs valeurs dont toutes soient connues mathématiquement, sauf une qui aura une erreur relative de $\frac{1}{100}$, le résultat lui-même sera par cela même entaché d'une erreur relative de $\frac{1}{100}$.

Inversement, si l'on désire avoir un résultat avec une approximation déterminée, il suffira de déterminer tous les nombres qui concourent à ce résultat avec cette même approximation ; il sera utile de faire des efforts pour diminuer certaines erreurs relatives partielles. Il y a toutefois lieu de faire une exception pour les méthodes soustractives, comme on le verra plus loin.

Pour graver ce fait important dans la mémoire, je citerai un exemple classique et des plus démonstratifs, c'est celui de la détermination du coefficient de dilatation absolu du mercure par Dulong et Petit.

La formule donnant ce coefficient de dilatation contient deux grandeurs à déterminer par l'expérience : l'une est la hauteur de la colonne de mercure froid, l'autre la différence de hauteur entre les colonnes de mercure chaud et froid. Or, la première de ces deux mesures semble avoir été très négligée par les deux expérimentateurs, qui la déterminent par une simple lecture sur une règle divisée placée à côté de la colonne de mercure froid. L'autre mesure est, au contraire, l'objet de toutes leurs sollicitudes, c'est au cathétomètre qu'elle se fait avec toutes les précautions et tout le soin possibles. Ce que nous avons dit plus haut va nous éclairer sur cette manière d'agir. La différence de hauteur entre les colonnes de mercure chaud et de mercure froid est assez petite ; supposons qu'elle ait 2 centimètres : en l'évaluant avec une erreur absolue de un vingtième de millimètre, on a une erreur relative de $\frac{1}{400}$.

Le résultat final sera donc entaché certainement d'une erreur de $\frac{1}{400}$ et il est inutile de connaître avec une plus grande approximation l'autre facteur qui doit concourir au résultat. Cet autre facteur est la hauteur de la colonne de mercure froid, elle a environ 50 centimètres ; en la mesurant avec une erreur absolue de 1 millimètre, cela suffit largement, car il n'en résultera qu'une erreur relative de $\frac{1}{500}$.

On voit le rôle important de l'erreur relative ; il se pose alors une question : dans une recherche donnée, quelle est l'erreur relative que l'on peut se permettre ? Il est impossible de répondre à une pareille question. Souvent cette limite se détermine d'elle-même par suite de l'impossibilité où l'on se trouve de dépasser une certaine approximation pour l'une des variables en jeu ; c'est ce qui arriva à Dulong et Petit. D'autres fois, et c'est en général le cas dans les sciences appliquées, et surtout dans les sciences biologiques, c'est le bon sens qui doit guider l'expérimentateur. Ce n'est que l'habitude du laboratoire, une éducation spéciale qui ne se prend que là et un jugement droit qui indiquent les limites dans lesquelles il est permis de tolérer des erreurs. Il faut avoir ce que j'appellerai la notion des approximations utiles. Il est aussi antiscientifique de vouloir être trop précis que d'être trop vague, et il est aussi inutile de mesurer la taille d'un homme au vernier que de déterminer une distance géodésique au pas. Mais toujours un bon expérimentateur doit se rendre compte des limites de ses erreurs, afin de savoir, lorsqu'il trouvera certains écarts, s'il faut les faire rentrer dans les erreurs d'expérience inhérentes à la nature même des recherches auxquelles il se livre, ou s'il y a lieu de les attribuer à d'autres causes.

Aucune leçon théorique ne remplacera jamais le laboratoire : ce n'est que là que l'on apprend à expérimenter ; cependant, quelques règles générales peuvent être signalées.

Il y a lieu de se tenir en garde contre deux genres de méthodes de mesure qui entraînent forcément des erreurs considérables, c'est ce que j'appellerai les méthodes par soustraction et les méthodes par division ; il ne faut y avoir recours qu'en cas de nécessité absolue.

Voici en quoi elles consistent :

1° Une grandeur étant à déterminer, on mesure deux autres grandeurs qui, par soustraction, donnent la grandeur cherchée ;

2° On diminue dans un certain rapport la grandeur à mesurer, et on mesure le quotient ainsi obtenu.

Prenons un exemple de chacun de ces cas.

1° Supposons encore une mesure de longueur.

On veut connaître la longueur AB : il faut mesurer directement AB, et non

Fig. 1.

mesurer AC, puis BC et faire la différence, car les procédés de mesure qui permettent de mesurer ces longueurs comportent généralement la même

erreur relative. Supposons, pour simplifier, que cette erreur relative soit de $\frac{1}{1000}$, AB ayant 1 centimètre et AC environ 1 mètre. Si on mesure directement AB, il est entendu que l'erreur relative obtenue sera $\frac{1}{1000}$. Mesurons AC, l'erreur relative étant $\frac{1}{1000}$, l'erreur absolue sur AC sera de 1 millimètre, de même l'erreur absolue sur BC sera aussi d'environ 1 millimètre.

En faisant la différence, on aura une incertitude de 1 millimètre au moins sur AB, c'est-à-dire que l'erreur relative sur AB sera de $\frac{1}{10}$ au lieu d'être de $\frac{1}{1000}$, comme le permettrait une mesure directe de longueur. On voit que les méthodes par différences ne conservent pas dans le résultat l'erreur relative des quantités qui y entrent; il faut donc ne les employer qu'à défaut d'autres procédés de mesure.

2° Pour le second cas, il y a lieu de l'éviter chaque fois que la méthode de mesure employée comporte une certaine erreur absolue. Ainsi, quand on cherche à déterminer une certaine quantité de chaleur, un des procédés employés consiste à transporter cette chaleur sur un certain poids d'eau et à mesurer l'élévation de température de cette eau. La précision de la méthode est limitée par l'erreur du thermomètre. Supposons que cette erreur soit de $\frac{1}{10}$ de degré. Si la quantité de chaleur que nous mesurons se trouve sur 1 litre d'eau dont elle a élevé la température de 0° à 50°, nous trouvons 50 calories, l'erreur relative étant de $\frac{1}{500}$. Si cette même quantité de chaleur se trouve sur 10 litres d'eau, l'élévation de température ne sera que de 5° et l'erreur relative de $\frac{1}{50}$. Enfin, si nous avions pris 100 litres d'eau, la température ne se serait élevée que de 0°,5 et l'erreur relative aurait été de $\frac{1}{5}$.

On voit que les deux méthodes que nous venons d'indiquer entraînent une augmentation des erreurs dans deux cas différents.

La première est à rejeter chaque fois que l'on est soumis par les conditions des instruments de mesure à une erreur relative déterminée; il y a alors tout intérêt à déterminer directement la valeur de la grandeur à mesurer.

La deuxième est surtout dangereuse quand la technique fixe l'erreur absolue.

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE MÉCANIQUE

Par G. WEISS.

LE REPOS ET LE MOUVEMENT

Un corps peut se trouver à l'état de repos ou à l'état de mouvement.

Considérons un corps assez petit pour pouvoir être assimilé à un point ; lorsque ce corps se déplacera dans l'espace, il décrira une courbe que l'on appelle la trajectoire du corps. Si le corps a des dimensions plus grandes, chacun de ses points aura sa trajectoire spéciale.

Ces trajectoires peuvent affecter les formes les plus diverses, depuis la ligne droite jusqu'à la courbe la plus compliquée. L'étude de ces formes comprend ce que l'on appelle la *Géométrie*.

Mais la connaissance de la trajectoire d'un mobile ne donne qu'une idée très incomplète de son mouvement. Pour mieux le faire comprendre, prenons un exemple. Lorsqu'un petit corps tombe en chute libre, il décrit une droite; sommes-nous par cette connaissance complètement renseignés sur le mouvement du corps? Il n'en est rien; il faut encore savoir en quel point de sa trajectoire le corps se trouve aux différents moments de sa course. De même, si un train parcourt la ligne de chemin de fer de Paris-Marseille, la connaissance géométrique de la forme de la ligne ne nous suffit pas, il faut avoir l'horaire du train. — Nous voyons donc intervenir un élément nouveau, le temps, nous passons de la Géométrie à la Mécanique.

La Mécanique elle-même comprend plusieurs parties :

En premier lieu, il faut étudier le mouvement des corps sur les trajectoires de leurs divers points, mais sans s'occuper des causes du mouvement ; cette étude comprend la *Cinématique*.

Les corps matériels sont soumis à l'action de ce que l'on appelle les forces; l'étude de ces forces et de leurs effets comprend la *Statique* lorsque les corps sont au repos, la *Dynamique* lorsqu'ils se meuvent sous l'action des forces.

CINÉMATIQUE

MOUVEMENT D'UN POINT MATÉRIEL

Mouvement uniforme. — Considérons un point se déplaçant en ligne droite. Le cas le plus simple qui puisse se présenter, c'est qu'à un moment quelconque de l'observation, les espaces parcourus soient égaux dans des temps égaux. C'est-à-dire qu'il faille toujours le même temps pour parcourir un mètre par exemple, quel que soit le moment où nous observions le corps. On dit alors que le mouvement est uniforme. Ainsi un train lancé sur une voie en ligne droite et parcourant 1 kilomètre par minute est dit animé d'un mouvement uniforme.

On appelle vitesse d'un point en mouvement uniforme la longueur du chemin parcouru dans l'unité de temps. On dit alors qu'une balle de fusil a une vitesse de 500 mètres à la seconde, un train une vitesse de 1 kilomètre à la minute, une voiture de 12 kilomètres à l'heure.

Mouvement varié. — Mais il arrive très souvent qu'il n'en est pas ainsi. Une voiture roulant sur une route droite peut avoir une allure très variable; de même, si nous lançons un corps de bas en haut suivant une verticale, même sans observation précise, nous remarquons qu'il met moins de temps à franchir 1 mètre au bas de sa trajectoire qu'au haut. Dans ces cas, le mouvement est dit varié.

La notion de vitesse se complique un peu dans ce cas, et pour bien comprendre ce que l'on entend par vitesse dans le mouvement varié, revenons un instant au mouvement uniforme. L'unité de temps généralement adoptée dans la mesure des vitesses est la seconde; par conséquent, dans un mouvement uniforme, il faudra mesurer l'espace parcouru par le corps dans une seconde. Pratiquement, il est souvent impossible de faire cette mesure pendant une seconde, mais une durée d'observation quelconque rendra les mêmes services. Supposons en effet que l'observation ait duré 10 secondes, il suffira de diviser la longueur mesurée par 10 pour avoir la vitesse par seconde; d'une manière générale, dans chaque cas on aura la vitesse du mouvement uniforme en divisant la longueur du chemin parcouru par le nombre de secondes exigées pour ce parcours. Bien entendu, il arrive parfois que l'observation dure moins d'une seconde, mais cela ne change rien à la règle que nous venons de poser. Ce cas se présente généralement pour les grandes vitesses lorsqu'une petite étendue de la trajectoire est seule accessible, ainsi lorsqu'on mesure la vitesse des projectiles à la sortie de la bouche à feu, ou la vitesse de l'onde musculaire, ou encore la vitesse de propagation de l'influx nerveux.

Passons maintenant au mouvement varié. Pour fixer les idées, considérons un tramway parcourant une voie idéale de 10 kilomètres en ligne droite et employant une heure à faire ce parcours. Si le mouvement était uniforme, nous aurions sa vitesse en divisant le chemin parcouru par le temps; on

obtiendrait ainsi une vitesse de $2^m,80$ environ à la seconde. Ce chiffre exprime ce que l'on appelle la vitesse moyenne du corps, mais cela ne veut nullement dire qu'en un point quelconque de la voie le tramway parcourait $2^m,80$ par seconde : par moment il franchissait plus, par moment moins; on peut même supposer des arrêts. Mais plaçons-nous en un point du parcours et là mesurons une longueur de 100 mètres par exemple et comptons le temps nécessaire pour que le tramway la franchisse, nous déduirons de cette observation une certaine vitesse moyenne. Faisons la même expérience avec des distances de plus en plus petites, nous arriverons à considérer la vitesse moyenne au point où nous nous trouvons, sur 1 mètre, 1 décimètre, 1 centimètre, etc. Or si cet espace parcouru est assez petit, nous pouvons admettre qu'en le traversant la vitesse du corps n'a pas varié et nous disons que, par définition, la vitesse du corps à l'endroit où nous nous trouvons est la vitesse moyenne tirée d'une observation de très courte durée. C'est la vitesse que prendrait le corps si, à partir du point d'observation, le mouvement devenait uniforme.

Donc, pratiquement, si l'on veut connaître la vitesse à un moment donné d'un corps en mouvement varié, il faut faire une observation sur un parcours assez restreint pour que dans cet espace on puisse considérer le mouvement comme uniforme. Ainsi, quand un projectile sort du canon, il prend une certaine vitesse qui va en diminuant; pour mesurer la vitesse initiale, c'est-à-dire la vitesse au commencement de la trajectoire, on fait cette mesure sur un parcours d'un mètre environ pendant lequel il n'y a pas encore eu de diminution.

Mouvement uniformément varié. — Parmi les divers mouvements variés, il en est un particulièrement intéressant, c'est celui où cette variation se produit régulièrement, où, dans des temps égaux, la vitesse augmente ou diminue de quantités égales. L'exemple classique est celui du mouvement d'un corps en chute libre. L'expérience montre que si on observe un pareil corps au bout de 1 seconde, 2 secondes, 3 secondes, etc., sa vitesse augmente d'une même quantité chaque fois qu'une nouvelle seconde s'écoule. Ainsi, en supposant négligeable la résistance de l'air et mesurant la vitesse d'un corps en chute libre au bout de la première seconde de chute, on trouve qu'elle est de $9^m,808$ par seconde; si, maintenant, à un moment quelconque, nous mesurons cette vitesse, puis encore une seconde plus tard, nous pourrons constater que pendant ce laps de temps la vitesse du corps a augmenté de $9^m,808$ par seconde. Le mouvement dont la vitesse va ainsi en augmentant régulièrement est dit uniformément accéléré.

Mais il pourra arriver qu'un corps soumis à l'influence de la pesanteur soit lancé verticalement de bas en haut; sa vitesse, au lieu d'aller en croissant, diminuera sans cesse jusqu'à venir à zéro; à partir de ce moment, le corps cessera de s'élever; nous pourrons trouver par l'expérience que dans ce cas la variation de la vitesse est encore constante : chaque fois qu'une seconde s'écoule, la vitesse diminue de $9^m,808$; nous avons affaire à un mouvement uniformément retardé.

Nous verrons plus loin l'importance du mouvement uniformément varié.

Il est souvent utile de connaître la vitesse d'un point sur sa trajectoire. On représente conventionnellement cette vitesse par une flèche dont l'orientation indique la direction de la vitesse. Il en résulte que cette flèche doit être tangente à la trajectoire du corps. De plus, on donne à la flèche une longueur proportionnelle à la grandeur de la vitesse. Sur un dessin, une certaine longueur de flèche figurant une vitesse de 1 mètre par seconde, une flèche deux fois, trois fois, dix fois plus longue représentera une vitesse de 2, 3, 10 mètres par seconde.

Composition des mouvements. — Le déplacement d'un corps, par rapport au milieu immobile dans lequel il est placé, peut parfois ne pas apparaître immédiatement dans son exactitude. C'est ainsi que la lune tournant autour de la terre semble au premier abord décrire une ellipse, mais la terre elle-même tourne autour du soleil entraînant la lune, et enfin le soleil se meut dans l'espace, sensiblement en ligne droite. Il en résulte que la lune parcourt une courbe très compliquée et difficile à se représenter; à chaque instant, la fraction de chemin qu'elle parcourt réellement est très différente de la portion d'ellipse sur laquelle elle se déplace par rapport à la terre. Pour avoir, à un moment donné, le déplacement réel de la lune, il faut faire ce que l'on appelle une composition de mouvements. Supposons que ces mouvements se réduisent à deux, c'est-à-dire que le soleil soit immobile; pendant que la lune passe de A en B sur son orbite terrestre, la terre se déplace, entraînant la lune dans le sens de la flèche V; la ligne AB sera donc finalement en CD, c'est-à-dire que la lune se sera transportée en D. La simple inspection de la figure montre que pour avoir le point d'arrivée final il faut, à partir du point d'origine A, porter en direction et en grandeur la valeur des deux déplacements que l'on veut composer, compléter le parallélogramme dont on a ainsi deux côtés, et tirer la diagonale. Les extrémités de cette diagonale sont le point de départ et le point d'arrivée. Ayant fait cette composition de mouvements, on pourrait combiner le déplacement AD avec celui du soleil, d'après la même règle.

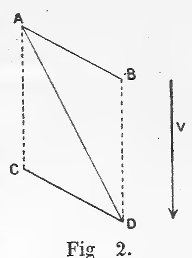


Fig 2.

Le problème se pose parfois sous un aspect un peu différent.

Quand un corps tombe en chute libre depuis un point A, il parcourt une verticale, sur laquelle, au bout de 1, 2, 3, etc., secondes, il se trouve aux points B, C, D, etc.

D'un autre côté, si on lançait un corps dans la direction Ab, abstraction faite du frottement de l'air et de la pesanteur, ce corps prendrait, suivant Abcd, un mouvement uniforme, c'est-à-dire qu'au bout de 1, 2, 3 secondes, il serait en des points b, c, d équidistants.

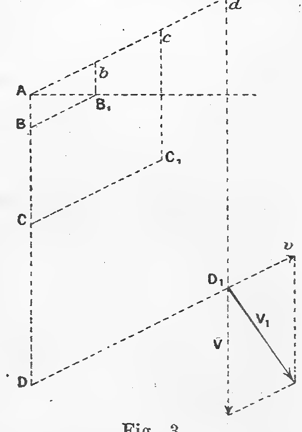


Fig. 3.

Mais supposons que ce corps lancé suivant A*bcd* ne soit plus soustrait à l'influence de la pesanteur, il y aura superposition des deux effets, il faudra faire des compositions de mouvements suivant la règle que nous avons indiquée tout à l'heure: au bout de 1 seconde, le corps sera en B_1, au bout de 2 secondes en C_1, de 3 secondes en D_1, etc.

Composition des vitesses. — Nous avons vu plus haut que la vitesse d'un corps en mouvement uniforme est l'espace parcouru dans l'unité de temps; il est par suite évident que la règle de composition des vitesses est la même que celle qui s'applique aux mouvements. Si le mouvement est varié, nous avons appelé vitesse, à un moment donné, la vitesse que prendrait le corps si, à ce moment, le régime devenait uniforme; par conséquent, la même règle subsiste encore.

Supposons, dans le cas de la figure précédente, que nous représentions par V la vitesse du corps due à l'accélération terrestre, au moment où ce corps se trouve en D_1, et par v la vitesse due à l'impulsion oblique, nous aurons la vitesse réelle représentée en grandeur et en direction par la flèche V_1.

Problèmes inverses. — Il arrive souvent que l'on ait à considérer un mouvement donné comme résultant de la combinaison de deux autres qu'il s'agit de trouver. Il peut se présenter deux cas.

Premier cas. — On a le déplacement AD et la direction AX, AY des deux composantes, trouver la grandeur de ces composantes. Cela revient à dire : On a la diagonale AD d'un parallélogramme et la direction AX, AY des deux côtés, compléter le parallélogramme. Il suffit de mener par D les parallèles BD, CD aux deux côtés déjà connus, AB et AC seront les déplacements cherchés.

Fig. 4.

Second cas. — On a le déplacement AD et une composante AB, trouver l'autre. Cette autre est évidemment BD, et il est facile de compléter le parallélogramme.

Il est à peine besoin d'ajouter que ces règles s'appliquent aux vitesses.

Les principes de composition et décomposition de mouvements que nous venons d'exposer ont beaucoup d'applications importantes, par exemple dans la méthode graphique.

Prenons un exemple. Lorsque l'on veut déterminer les déplacements dans l'espace des divers points du corps, afin d'étudier la locomotion animale, on ne peut pas avoir en une seule opération la trajectoire d'un de ces points, on étudie alors leurs mouvements suivant différentes directions, et, une fois en possession de ces documents, on fait des compositions de mouvements. La courbe décrite par le pubis pendant la marche est très compliquée; il a fallu déterminer par des opérations séparées ses oscillations verticales, puis ses déplacements latéraux, et enfin son mouvement suivant la ligne de progression du corps. En combinant ensuite ces résultats, on a pu se rendre un compte très exact du mouvement du pubis dans l'espace.

Il arrive aussi que, connaissant la trajectoire d'un point dans l'espace, il faille faire une décomposition de mouvements pour pouvoir la représenter

sur le papier; cela est nécessaire chaque fois que la courbe n'est pas plane. Les applications se rencontreront du reste assez fréquemment dans les autres chapitres de ce traité, pour que nous puissions nous dispenser d'insister en ce moment sur ce point.

Accélération. — Reprenons le cas d'un mouvement uniformément varié, par exemple celui du corps qui tombe en chute libre. Nous avons vu qu'à chaque seconde correspond une même augmentation de vitesse de $9^m,808$. Cette quantité, dont la vitesse s'accroît dans l'unité de temps, est ce que l'on nomme l'accélération du mouvement.

L'accélération peut être plus ou moins grande, et la vitesse ira, par suite, en croissant plus ou moins rapidement.

Il peut arriver que dans un mouvement varié la vitesse aille en diminuant; c'est ce qui se produit, par exemple, lorsqu'un corps pesant est lancé de bas en haut. Alors, l'accélération agit en sens inverse de la direction du déplacement.

Dans l'un et l'autre cas, l'accélération dirigée dans le sens du mouvement ou en sens inverse, mais étant parallèle à la direction de ce mouvement, n'a d'autre effet que d'altérer la vitesse du corps en grandeur sans en modifier la direction.

Il peut arriver que l'accélération fasse un certain angle avec la direction de propagation du corps. Par exemple, lançons un corps dans la direction AX; si ce corps était dépourvu de toute accélération, par définition même il suivrait la ligne AX avec une vitesse constante. Mais l'accélération terrestre donne au corps une certaine vitesse verticale, nulle au début, et augmentant de $9^m,808$ par seconde; il faudra combiner cette vitesse avec la vitesse initiale du corps, qui ne suivra plus une ligne droite, comme nous l'avons déjà vu plus haut. Supposons qu'au bout de 3 secondes, par exemple, le corps soit en B, en ce moment il aura une vitesse verticale égale à $9^m,808 \times 3$; représentons cette vitesse par V. Il aura toujours sa vitesse initiale v, par conséquent la vitesse résultante réelle du corps sera V_1.

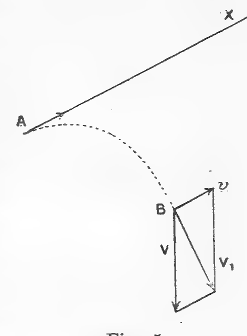


Fig. 5.

Dans un mouvement uniformément accéléré, il est facile de calculer l'accélération. Nous savons, en effet, que cette accélération est la variation de la vitesse en 1 seconde. Si, au lieu de déterminer cette variation pendant 1 seconde, nous obtenons, par un procédé quelconque, sa valeur pendant 2, 3, etc., 10 secondes, il faudra diviser le résultat obtenu par 2, 3, etc., 10. C'est-à-dire que l'on aura la valeur de l'accélération en divisant la variation de la vitesse pendant un temps quelconque, par ce temps exprimé en secondes. Pour définir l'accélération dans un mouvement non uniformément varié, nous allons faire un raisonnement analogue à celui qui nous a servi à définir la vitesse non constante.

Prenons un point mobile animé d'un mouvement quelconque, et mesurons sa vitesse à deux instants. Ces deux vitesses diffèrent par une certaine com-

posante. La valeur de cette composante divisée par le temps écoulé entre les deux observations, exprimé en secondes, sera l'accélération moyenne du point dans cet intervalle. Si on restreint de plus en plus cet intervalle, on a une série de valeurs de l'accélération moyenne à des instants de plus en plus rapprochés, et à la limite, quand ces deux instants sont assez voisins pour pouvoir être confondus, l'accélération moyenne du point est ce que l'on appelle l'accélération à l'instant considéré.

Si l'accélération est parallèle à la direction du mouvement, le mouvement est accéléré ou retardé uniformément; si l'accélération fait un certain angle avec la direction du mouvement initial, le corps décrit une courbe.

Mais le cas peut se compliquer encore; il peut arriver, en effet, que l'accélération soit variable en grandeur ou en direction. Si elle est parallèle au chemin parcouru et de grandeur variable, le corps décrira une droite; sa vitesse variera non uniformément, mais d'une façon plus ou moins compliquée, suivant les variations de l'accélération. Remarquons seulement que pour que la vitesse aille tantôt en augmentant, tantôt en diminuant, il faut que l'accélération change de sens.

Si l'accélération n'est plus parallèle au chemin parcouru, elle peut, en variant de grandeur et de direction, produire les mouvements les plus compliqués que nous ne pouvons étudier ici.

Cependant, il en est un qui se rencontre fréquemment, et par suite de son importance nous devons le signaler. C'est celui où le corps tourne autour d'un centre. C'est le mouvement du cheval attelé au bras d'un manège, ou d'un corps lourd animé d'une rotation au bout d'une ficelle tenue à la main. Ce mouvement se rencontre aussi *grosso modo* dans un grand nombre d'articulations, avec cette différence que le membre mobile n'accomplit pas de révolution complète, mais se déplace dans un sens alternatif.

Considérons le point A qui se déplace en cercle autour du point O, en passant successivement par A′ A″, etc., et supposons, pour plus de simplicité, que la vitesse de A soit de grandeur constante, c'est-à-dire que A parcourt des arcs égaux dans des temps égaux. Nous voyons qu'en joignant A au centre du cercle, le rayon AO formera le bras de cette espèce de manège; et un point quelconque a de ce bras décrira aussi un cercle.

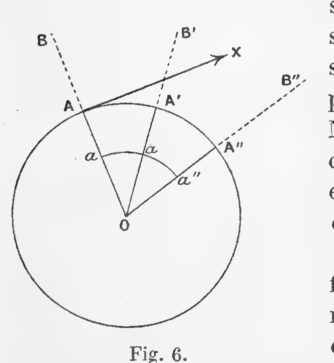


Fig. 6.

Des notions de géométrie très élémentaires font comprendre que, pour le même déplacement du bras, la vitesse d'un point de ce bras est d'autant plus grande que ce point est plus éloigné du centre; la vitesse de A est plus grande que celle de a, celle de B plus grande que celle de A.

Portons sur OAB une longueur Oa égale à l'unité, à 1 mètre par exemple, le chiffre qui représente la vitesse réelle de a est ce que l'on appelle, par définition, la vitesse angulaire du rayon OB.

Ainsi, si a parcourt un arc de 1 mètre par seconde, la vitesse angulaire

de OAB sera 1 ; si a parcourt 2 mètres par seconde, sa vitesse angulaire sera 2, etc. Tous les points du levier OB ont la même vitesse angulaire que a ; nous allons voir que, de là, on déduit facilement la vitesse réelle de chaque point.

Supposons que OA ait 2 mètres, c'est-à-dire le double de Oa, la géométrie nous apprend que A parcourt dans son mouvement un chemin double de celui de a, par suite A a une vitesse double de celle de a ; on a donc la vitesse réelle de A en multipliant la vitesse angulaire par 2. — Si OA avait 3 mètres, triple de Oa, on aurait de même la vitesse de A en multipliant la vitesse angulaire par 3, etc. D'une façon générale, on a la vitesse d'un point en multipliant sa vitesse angulaire par sa distance au centre.

Nous verrons plus loin par quel mécanisme se produit une pareille rotation ; remarquons seulement en ce moment que le point A possède à un moment donné une vitesse AX. Si ce point A était absolument libre et affranchi de toute action, il devrait continuer son chemin en ligne droite suivant AX, avec une vitesse uniforme ; comme il est dévié de cette droite pour se mouvoir en cercle avec une vitesse dont la direction change à chaque instant, nous pouvons en conclure que cette déviation est produite par une certaine accélération.

Composition des accélérations. — Les accélérations se représentent comme les vitesses, en grandeur et en direction, par des flèches, et d'après la manière dont nous avons établi l'existence de ces accélérations, on peut comprendre que leur règle de composition est la même que la règle de composition des vitesses.

MOUVEMENTS DES SYSTÈMES INVARIABLES

Ce qui précède suffit pour l'étude du mouvement d'un corps très petit, assimilable à un point. Voyons maintenant comment les choses se passent pour un solide de dimensions quelconques mais invariables, c'est-à-dire pour un corps ne changeant pas de forme pendant le mouvement que nous allons étudier. Alors que le trajet d'un point dans l'espace était complètement défini par une courbe, il faut maintenant pouvoir connaître la courbe de chacun des points du corps et, de plus, savoir comment ces points se déplacent sur leurs trajectoires. Pour éclaircir ce point, prenons un exemple simple. Supposons que le corps se réduise à un bâton mince AB, se déplaçant dans l'espace. Il ne nous suffira plus de savoir que le point A décrit la droite AX par exemple, car, en outre, le reste du bâton, le point B en particulier, pourrait se mouvoir de bien des façons. Il faut encore donner la trajectoire du point B ; elle sera, par exemple, la droite BY. Dès lors, la géométrie nous apprend à trouver les positions successives de la droite AB et nous permet de tracer la trajectoire d'un point quelconque M de cette droite. Nous avons représenté sur la figure quelques positions de AB et la trajectoire de M.

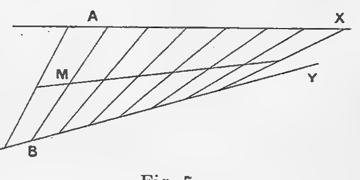


Fig. 7.

Voyons donc quels sont les divers cas que nous pouvons rencontrer dans le mouvement des corps.

1. — Le cas le plus simple est celui de la translation. Les trajectoires des divers points du corps sont identiques, tous les points ont à un moment donné la même vitesse en grandeur et en direction. Supposons encore le cas simple d'un bâton, la figure ci-contre représentera une translation ; dans son mouvement, la droite AB, figurant le bâton, restera parallèle à elle-même, et, sans démonstration, on voit que la trajectoire de B est identique à celle de A, ou à celle d'un autre point quelconque M du bâton. On comprend aussi qu'à un moment quelconque tous les points du bâton aient la même vitesse en grandeur et en direction.

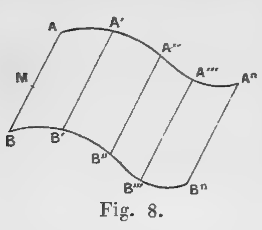
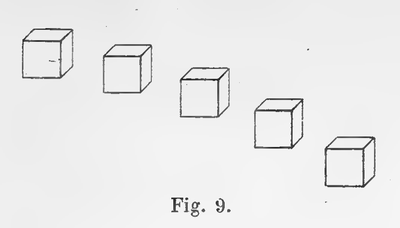


Fig. 8.

La translation d'un corps quelconque est dès lors facile à se figurer : toute droite reliée au corps doit, dans ce mouvement, rester toujours parallèle à elle-même.


Fig. 9.

Sur la figure ci-contre, nous avons représenté la translation d'un cube.

D'après ce que nous venons de dire, quand un corps est animé d'une simple translation, il suffit de donner le mouvement d'un de ses points par sa trajectoire et sa position sur cette trajectoire à chaque instant.

2. — *Rotation d'un corps autour d'un axe fixe.* — Ce mouvement est facile à concevoir, tous les points du corps ont la même vitesse angulaire, et par conséquent, connaissant le mouvement de l'un d'eux, on a celui de tous les autres, d'après la règle que nous avons donnée plus haut. Chaque point décrit un cercle dont le plan est perpendiculaire à l'axe de rotation, et ayant pour rayon la distance à l'axe ; la trajectoire de chaque point, étant plane, peut se représenter sur le papier.

3. — Un déplacement un peu plus compliqué et nécessitant quelques explications est celui qui résulte du roulement d'une courbe sur une autre.

Considérons d'abord deux polygones $abcd$, etc., et $a'b'c'd'$, etc., dans lesquels $ab = a'b'$, $bc = b'c'$, $cd = c'd'$, etc. ; le polygone P′ est fixe dans le plan du papier, P mobile a en ce moment le côté ab en coïncidence avec $a'b'$.

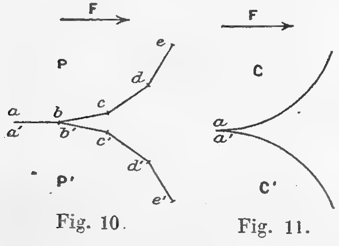


Fig. 10. Fig. 11.

Faisons tourner le polygone P autour de b comme centre dans le sens de la flèche F, jusqu'à ce que bc vienne sur $b'c'$, puis, dans cette nouvelle position, le polygone P tournera autour de c maintenant en coïncidence avec c' et ainsi de suite. Les divers côtés du polygone P viendront s'appliquer sur ceux de P′, P tournant successivement autour de ses divers sommets. On dit que P roule sur P′. Ce que nous venons de dire est indépendant de la grandeur des côtés des polygones ; quand ils deviennent de plus en plus petits, on finit

par avoir deux courbes C et C', la première roulant sur la seconde.

Dans leur roulement, le polygone P ou la courbe C peuvent entraîner différentes figures du plan qui leur seraient invariablement reliées et leur imprimer ainsi des mouvements très compliqués.

Toutefois ces mouvements offrent quelque chose de particulier fort important. Tous les points qui, au début du roulement, se trouvent dans le plan du papier, y restent pendant tout leur déplacement, autrement dit ont une trajectoire plane. De même, si P ou C entraînaient des corps faisant saillie sur le papier, tous les points se trouvant sur une même perpendiculaire au papier ont la même trajectoire. Par conséquent, lorsque la loi du roulement est connue, on peut étudier, par des constructions sur le papier, le mouvement d'un point quelconque des corps entraînés. Cette étude est parfois très compliquée ; on ne peut donner de règle générale à cet égard ; dans chaque cas particulier il y aura un problème à résoudre.

Le corps mobile, au lieu de rouler sur C, peut glisser le long de cette courbe, cela signifie que c'est toujours le même point de C qui se trouve en contact avec C' et, comme dans le cas précédent, on peut représenter sur le papier les trajectoires des divers points liés à C.

Mais il peut arriver, et le cas se présente dans beaucoup d'articulations, qu'il y ait à la fois roulement et glissement. Pour le concevoir clairement, prenons encore deux polygones P et P', les côtés de P' étant plus grands que ceux de P. Dans le cas de la figure, *ab* est appliqué sur *a'b'*, *a* et *a'* coïncident. Pour déplacer P, commençons par faire glisser ce polygone dans le sens de la flèche jusqu'à ce que le point *b* vienne en *b'*. A ce moment, faisons tourner P autour du point *b* jusqu'à ce que *bc* soit appliqué sur *b'c'*. Nous effectuerons ensuite un glissement pour amener *c* en *c'* et une nouvelle rotation pour coucher *cd* sur *c'd'* et ainsi de suite. On voit que le mouvement de P consistera en une série de glissements et de rotations. Lorsque nous passerons à des polygones de plus en plus petits, le même mouvement subsistera, et à la limite nous pouvons nous figurer deux courbes roulant et glissant l'une sur l'autre. On pourra encore représenter sur le papier le mouvement d'un point quelconque relié à la courbe roulante.

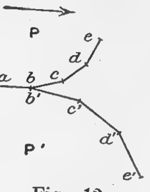


Fig. 12.

Au premier abord, il semble y avoir une différence absolue entre les trois mouvements que nous venons d'étudier : roulement, glissement et roulement avec glissement ; en réalité, tous ces problèmes rentrent dans le premier. On démontre, en effet, que lorsqu'un corps se déplace parallèlement à un plan, ce qui est réalisé dans le cas que nous considérons, le mouvement peut toujours être obtenu par le roulement de deux courbes, l'une mobile liée au corps, l'autre fixe dans le plan. Dans chaque cas, le problème consiste à trouver ces deux courbes, ce qui peut être très difficile, mais il est toujours possible de représenter les courbes et le mouvement sur le papier.

4. — Il n'en est plus de même lorsque le corps ne se déplace pas parallèlement à un plan.

Prenons, par exemple, un corps assujetti simplement à tourner autour d'un

point fixe. La trajectoire de chacun de ses points sera sur une sphère et il sera aussi impossible de la représenter sur un papier qu'il l'est de faire une carte plane du globe terrestre.

Dans ce cas, nous avons encore choisi un exemple simple, mais on se figure aisément des corps animés de mouvements très compliqués, dans l'étude desquels il nous est absolument impossible d'entrer ici.

LA FORCE

Principe de l'inertie (Newton). — Un corps matériel ne peut modifier son état de repos ou de mouvement sans l'intervention d'une cause extérieure.

La première partie de ce principe se conçoit aisément : un corps au repos ne se met pas en mouvement spontanément, il faut qu'une cause extérieure agissant sur lui le déplace. Ainsi un poids posé sur le sol y restera indéfiniment immobile, s'il reste abandonné à lui-même.

La deuxième partie demande quelques explications. Lorsqu'un corps est en mouvement, à un instant donné il possède une certaine vitesse. S'il est absolument libre et soustrait à toute influence extérieure, il n'y a aucune raison pour que cette vitesse vienne à se modifier, soit en grandeur, soit en direction ; par conséquent, ce corps conservera une vitesse constante en grandeur et en direction, il parcourra une ligne droite d'un mouvement uniforme. Il n'aura aucune accélération. Pour modifier cet état de mouvement uniforme du corps, il faut lui communiquer une certaine accélération, ainsi que nous l'avons vu plus haut, et suivant cette accélération le mouvement du corps sera modifié soit dans sa vitesse simplement, soit dans sa trajectoire. Cette accélération que nous voyons intervenir ne se crée pas de rien, elle a une cause ; cette cause nous est inconnue dans son essence même, on lui donne le nom de force. Ainsi donc, lorsque la force agit sur un corps libre, elle lui communique une certaine accélération, ce qui met le corps en mouvement s'il était primitivement au repos, ou modifie sa trajectoire et sa vitesse s'il se déplaçait déjà.

Supposons, par exemple, un poids reposant sur le sol ; si tout à coup nous voyons ce poids s'élever d'un mouvement plus ou moins rapide, nous dirons que cette ascension est due à l'intervention d'une force.

Nous savons aussi qu'une pierre lancée dans l'espace se déplacerait en ligne droite d'un mouvement uniforme si la force d'attraction de la terre ne lui communiquait une certaine accélération, et que sous cette influence la pierre décrit une courbe.

Nous venons de voir comment la notion de force s'introduit en mécanique : la force est la cause de l'accélération. Mais nous ne sommes nullement renseignés sur la nature de la force ; jamais il ne nous a été donné de la voir ; nous ne la connaissons que par ses effets. De même que nous n'avons jamais vu de courant électrique et que nous ne connaissons son existence que par les effets qu'il produit, déviation de l'aiguille aimantée, décompositions chimiques, etc., de même nous ne connaissons la force que par l'accélération qu'elle produit.

Cependant, pour pouvoir étudier les effets des forces, il faut que nous puissions les mesurer comme nous mesurons les courants.

Lorsque nous étudions les décompositions chimiques produites par le courant électrique, nous prenons le système de mesure le plus simple et nous disons qu'un courant est deux fois, trois fois, etc..., dix fois plus intense qu'un autre courant pris comme unité, lorsque dans les mêmes circonstances ce premier courant produit une décomposition deux fois, trois fois, etc..., dix fois plus grande que le deuxième.

Pour évaluer les forces que nous ne connaissons que par les accélérations, nous opérerons de même; lorsque nous verrons un même corps prendre une accélération deux fois, trois fois, etc..., dix fois plus grande, nous dirons que la force qui agit sur lui est deux fois, trois fois, etc..., dix fois plus grande.

Mais si un même corps soumis à une même force prend toujours la même accélération, et si ce même corps soumis à des forces différentes prend une accélération proportionnelle à la force, comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, il n'en est plus de même quand on opère sur des corps différents; nous allons au contraire voir intervenir un nouvel élément des plus importants, la masse.

Admettons que nous puissions librement disposer d'une force constante et faisons-la exercer son action sur une série de corps; il pourra arriver que certains de ces corps prennent la même accélération : nous dirons qu'ils ont la même masse; ceux qui prendront des accélérations différentes auront des masses différentes. Pour simplifier, supposons que tous ces corps soient de même nature, qu'ils soient tous en cuivre par exemple; nous constaterons que ceux qui prennent la même accélération ont des volumes égaux, que les plus petits prennent l'accélération la plus grande, les plus grands l'accélération la plus petite. Prenons à part tous les corps ayant la même masse; en en réunissant deux nous formerons un corps ayant une masse double de chacun d'eux, et l'expérience nous prouvera que ce nouveau corps, soumis à notre force, prendra une accélération deux fois plus petite qu'un des corps pris seul. De même, en en réunissant trois nous formerons un corps de masse triple qui prendra une accélération trois fois plus petite que chacun des corps pris seul et ainsi de suite. En un mot, par cette expérience nous pouvons prouver que, soumis à une même force, divers corps prennent une accélération en raison inverse de leur masse.

Pour donner à tous les corps la même accélération, il faut leur appliquer des forces proportionnelles à leur masse. Ainsi, tous les corps soumis à l'attraction terrestre, à une même distance du centre de la terre, prennent la même accélération parce que la force exercée par l'attraction de la terre est proportionnelle à la masse des corps attirés.

Donc, on admet par convention que la force est proportionnelle à l'accélération et l'expérience démontre qu'elle l'est aussi à la masse du corps qu'elle met en mouvement.

Unités de force et de masse. — Avant d'aller plus loin, il faut choisir des unités nous permettant de mesurer les quantités que nous voulons étudier.

Comme toujours, ces unités sont des grandeurs de même espèce que les

grandeurs à mesurer. En France, elles sont reliées au système métrique et, pour des raisons qu'il est inutile d'exposer ici, on a pris comme unité de masse la masse de 1 centimètre cube d'eau distillée. Cette unité s'appelle le gramme. Comme unité de force, on a pris la force exercée par l'attraction terrestre sur le gramme.

Souvent on emploie des unités mille fois plus grandes, on a alors la masse de 1 kilogramme correspondant au décimètre cube d'eau distillée, et la force que l'attraction terrestre exerce sur cette unité, et que par abréviation on appelle une force de 1 kilogramme.

Sur les figures, les forces se représentent par des flèches en grandeur et en direction, comme les accélérations, auxquelles elles sont proportionnelles.

Dans un grand nombre de cas, les forces auxquelles est soumis un corps ne proviennent pas d'une action à distance, mais résultent du contact d'autres corps. Les exemples en sont trop fréquents et trop connus pour qu'il soit nécessaire d'insister sur ce point.

La force se transmet intégralement en grandeur et en direction à travers les corps rigides. Supposons, par exemple, que nous ayons deux sphères A et B, au contact. En faisant agir par un procédé quelconque sur la sphère A une force représentée par la flèche F, dont le prolongement passe par le point de contact de A et B, nous obtiendrons sur B le même effet que si la force était appliquée directement à ce point de contact, elle s'est transmise intégralement à travers A. Il est d'ailleurs indifférent que la force F soit appliquée en un point quelconque du corps A situé sur le prolongement de la flèche F représenté en ligne pointillée.

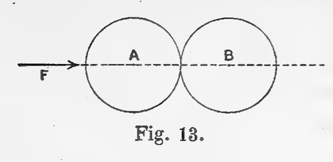


Fig. 13.

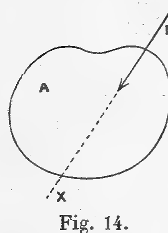


Fig. 14.

Ce fait est général. Lorsqu'une force F agit sur un corps rigide A, elle produit toujours le même effet, quel que soit le point de la direction FX auquel cette force est appliquée, elle se transmet toujours intégralement en ligne droite à travers tout le corps. Il est bien entendu que le corps doit être considéré comme absolument rigide et résistant ; nous verrons plus loin ce qui se passe lorsqu'il peut se déformer sous l'action des forces qui le sollicitent, que ce soit un liquide, un corps élastique ou un corps mou.

Mais revenons à la figure précédente : la force F, avons-nous dit, s'exerce sur le corps B par l'intermédiaire de A ; ici encore nous rencontrons un principe très important.

Principe de l'action et de la réaction (Newton). — A toute action correspond une réaction égale et de sens contraire.

C'est-à-dire, dans le cas particulier qui nous occupe, si le corps A exerce sur B une force F, inversement le corps B exerce sur A au point de contact une force appelée la réaction précisément égale à F et dirigée en sens contraire. Si nous pressons avec le doigt contre le mur avec une force de 1 kilogramme, le mur à son tour presse contre notre doigt avec cette même force ; si par exemple nous avons mis entre le mur et le doigt une feuille de papier

très mince, cette feuille de papier supporte sur chacune de ses faces une pression de 1 kilogramme, d'un côté l'action du doigt et de l'autre la réaction du mur.

Ceci est vrai que les corps soient au repos ou en mouvement.

Action simultanée de plusieurs forces. — Il arrive souvent que plusieurs forces agissent simultanément sur un même corps. Prenons par exemple le cas le plus simple, celui où un corps A est soumis à l'action de deux forces F et F′ qui se trouvent dans le prolongement l'une de l'autre. Nous savons que ces deux forces peuvent être considérées comme appliquées en un même point du corps situé sur la ligne XY, leur action s'ajoute et tout se passe comme si le corps subissait l'action d'une seule force R dirigée suivant XY et égale à la somme $F + F'$.

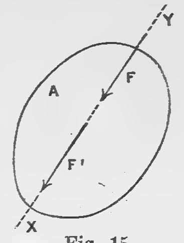


Fig. 15

F et F′ se nomment les deux composantes, R est la résultante.

Ainsi, si sur une table nous plaçons un poids de 2 kilogrammes, puis sur ce premier poids un autre de 3 kilogrammes, la table subit de haut en bas une pression de 5 kilogrammes.

De même, le long chef du biceps et le court chef étant sensiblement parallèles et s'attachant au même tendon inférieur, l'action résultante transmise par ce tendon au radius est égale à la somme des tractions développées par chacun des chefs du biceps.

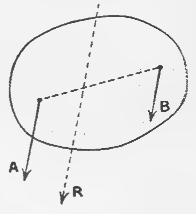


Fig. 16.

Il arrive souvent que des forces parallèles agissant sur un corps ne soient pas dirigées suivant la même droite; tel est, par exemple, le cas de la figure ci-contre, où les deux forces A et B sont parallèles mais dirigées suivant des droites différentes. Dans ce cas, on démontre que la résultante est encore égale à la somme des deux composantes, elle est parallèle à ces deux composantes, mais nous ne savons actuellement trouver sa position exacte; nous verrons plus loin comment cette détermination se fait.

Naturellement, lorsque le nombre des forces est supérieur à deux, on peut, en les associant, les réduire à une seule résultante. Cette résultante est égale à la somme de toutes les composantes et leur est parallèle.

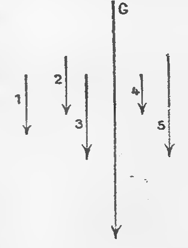


Fig. 17.

Elle passe par un point G que nous étudierons plus loin. Tout se passe comme si l'ensemble des forces était remplacé par une seule résultante appliquée en G.

Enfin, dans certains cas les forces, tout en étant parallèles, ne sont pas toutes dirigées dans le même sens; on démontre que, pour avoir la résultante, il faut ajouter toutes les forces dirigées dans le sens direct, et retrancher de cette somme toutes les forces dirigées en sens inverse.

Il y a un cas particulièrement important, représenté sur la figure ci-contre, c'est celui où les forces se réduisent à deux, inverses l'une de l'autre et égales.

Quand on cherche la résultante, on trouve évidemment qu'elle est nulle. Cela veut-il dire que le corps ne subira aucun déplacement sous l'action des forces A et B? Nullement, mais le point G, auquel est appliquée la résultante de A et de B, reste immobile lors du mouvement du corps, c'est-à-dire que, sous l'influence des forces A et B, le corps tournera autour du point G, fixe dans l'espace.

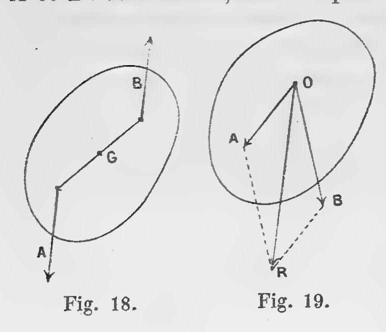


Fig. 18. Fig. 19.

Une association de deux forces telles que A et B se nomme un couple.

Lorsque deux forces ne sont pas parallèles, mais appliquées en un même point O d'un corps, leur règle de composition est la même que celle des accélérations, c'est-à-dire que leur résultante R est la diagonale du parallélogramme dont elles forment deux côtés.

Quand les deux forces ne sont pas appliquées au même point, mais que leurs prolongements se rencontrent en Ω, chacune de ces deux forces peut, comme nous le savons, se déplacer dans sa propre direction. En particulier nous pouvons les supposer transportées en Ω et nous serons ramenés au cas précédent.

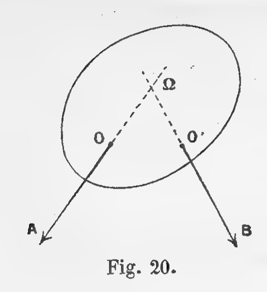


Fig. 20.

Mais souvent deux ou plusieurs forces appliquées à un même corps ne se rencontrent pas : ce problème devient alors trop compliqué pour être traité ici. Tout ce que nous pouvons dire, c'est qu'un nombre quelconque de forces agissant sur un corps peut toujours être réduit à une force et un couple.

Nous avons, dans ce qui précède, considéré l'action d'un petit nombre de forces. Dans la pratique, nous ne pouvons soustraire les corps matériels à l'action de la terre, chacune de leurs particules subit une attraction du globe terrestre et se trouve par suite soumise à une force. Toutes ces forces parallèles entre elles ont une résultante R dont la position dépend naturellement de la forme du corps, mais dont la grandeur est égale à la somme de toutes les composantes élémentaires.

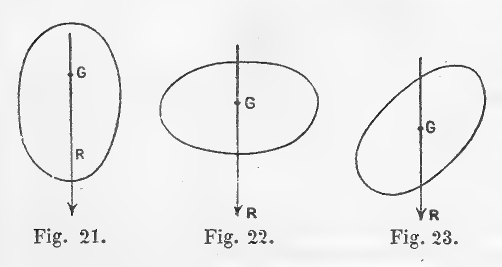


Fig. 21. Fig. 22. Fig. 23.

Quand nous plaçons le corps dans diverses positions, comme l'indiquent les figures successives, la grandeur de la résultante ne changera évidemment pas, puisqu'elle est toujours la somme de forces élémentaires indépendantes de la position du corps, mais l'orientation de la résultante par rapport au corps variera et dépendra de la position du corps. Or, dans toutes ces positions la résultante passera par un certain point G fixe dans le corps. Nous avons vu plus haut que chaque fois que l'on composait des forces parallèles appli-

quées en divers points, la résultante passait par un certain point G, dépendant de la grandeur et de la position des composantes.

Dans le cas de l'attraction terrestre où les composantes sont toutes des forces égales agissant sur toutes les particules du corps, la résultante, somme de ces composantes, devient le poids du corps et le point G est le centre de gravité ; nous verrons plus loin comment on peut déterminer le centre de gravité d'un corps.

Dans toutes les questions de mécanique qui se présenteront, nous pourrons toujours considérer l'action de la terre sur un corps solide comme se réduisant au poids total appliqué au centre de gravité.

STATIQUE

Lorsqu'un certain nombre de forces agissent sur un corps, il peut arriver que toutes ces forces, combinées entre elles, donnent une résultante nulle. On dit que ces forces se font équilibre. Il faut, bien entendu, comprendre parmi ces forces le poids du corps.

Le corps se trouve alors dans les mêmes conditions que si toutes ces forces étaient supprimées ; en particulier, s'il est au repos, il reste au repos.

L'étude de ce cas particulier est désignée sous le nom de Statique.

La Dynamique comprend au contraire l'étude du mouvement produit par les forces.

Un corps matériel au repos n'est généralement pas absolument libre ; il se trouve en contact avec d'autres corps qui l'empêchent de se mouvoir sous l'influence des forces qui agissent sur lui, en particulier de la pesanteur. On dit qu'il est soumis à des liaisons.

Ces liaisons sont de trois espèces :

1° Le corps peut être assujetti à tourner autour d'un point fixe. Ainsi un corps suspendu à un fil peut seulement osciller autour du point d'attache supérieur du fil ; de même une toupie tournant sur sa pointe ;

2° Le corps est assujetti à tourner autour d'un axe fixe. Les exemples de ce cas sont trop fréquents pour qu'il y ait lieu d'y insister ;

3° Le corps ne peut que se déplacer sur une surface.

Nous allons dans ces trois cas rechercher quelles sont les conditions pour que le corps reste en équilibre, immobile sous l'action des forces qui le sollicitent.

ROTATION DES CORPS AUTOUR D'UN POINT

Considérons un corps fixé par un procédé quelconque en un point O, et soumis à une force extérieure F, cette force F pouvant être la résultante de plusieurs forces.

Si la direction de la force passe par le point de suspension, le corps sera en équilibre ; nous avons vu en effet que l'on pouvait transporter la force dans sa propre direction en un point quelconque du corps, en particulier nous pourrons la supposer appliquée au point O, et, ce point étant fixe par hypothèse,

l'effet de la force sera nul au point de vue du mouvement qu'elle produira. Le point O subira par l'intermédiaire du corps une traction égale à F, et inversement, d'après le principe de Newton, le corps subira une réaction égale, et de sens contraire. En réalité, le corps se trouvera en équilibre sous l'action de la force F et de la réaction du point d'appui. Mais il arrivera souvent que la direction de la force F ne passe pas par le point d'appui fixe du corps. Aucun des points situés sur la direction de la force F n'est assujetti à rester immobile, ils seront entraînés dans la direction de cette force, et le corps tournera dans le sens indiqué par la flèche *f*. Si l'on suppose la flèche F située dans le plan du papier, il n'y aura rien de changé au mouvement si l'on pique en O un axe perpendiculaire au plan de ce papier, le corps tourne donc autour de O comme autour d'un axe; mais il peut arriver que la direction de F venant à changer, cette force ne reste plus dans le plan du papier et qu'alors la direction de l'axe de rotation fictif change aussi.

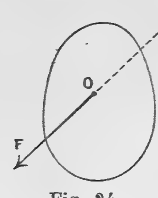


Fig. 24.

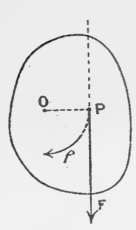


Fig. 25.

L'action de la force F sur la rotation du corps ne dépend pas seulement de la grandeur de cette force; on fait voir dans l'étude de la mécanique que la distance de la force au point de rotation O a aussi son influence. Ces deux éléments, grandeur de la force F et distance de la force au point O, entrent dans la constitution de ce que l'on appelle le moment de la force par rapport au point O; c'est de la valeur de ce moment que dépend la rotation.

Si deux forces sont égales et également distantes du point O, par exemple F et F′, les moments de ces deux forces sont les mêmes, puisque les deux grandeurs dont dépend le moment n'ont pas changé, la rotation du corps sera identique, sous l'influence de la force F, ou sous celle de la force F′.

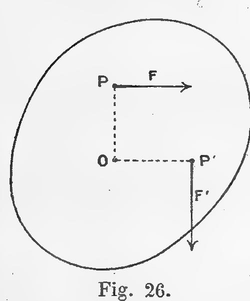


Fig. 26.

Si la force F double ou triple de valeur, il est évident que le moment croît dans la même proportion, car on peut toujours décomposer la force totale en forces composantes égales à F, et donnant chacune un moment agissant pour son compte. Le moment total égal à la somme des moments composants sera deux fois, trois fois, etc., plus grand que celui de F, suivant que la force a donné deux, trois, etc., composantes égales à F.

Quant à la distance OP, on démontre que plus elle augmente plus le moment s'accroît dans la même proportion.

Somme toute, le moment est proportionnel aux deux éléments qui le constituent; pour avoir sa valeur, on les multiplie l'un par l'autre comme le représente la formule :

$$M = F \times OP.$$

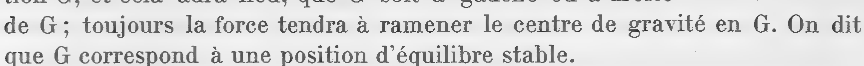
Lorsque la force passe par le point de rotation, le moment est nul, le corps

est en équilibre. Ainsi la condition pour qu'un corps mobile autour d'un point fixe soit en équilibre est que le moment de la résultante des forces soit nul, ou, ce qui revient au même, que la somme des moments de toutes les composantes soit nulle.

Voyons maintenant ce qui se passera lorsqu'une force de direction constante agira sur un corps mobile autour d'un point et, pour spécifier, supposons que cette force soit la pesanteur. Cette pesanteur sera représentée par une force F, appliquée au centre de gravité du corps.

Si la direction de F passe par le centre de rotation O, le corps se trouve en équilibre ; sinon, le centre de gravité étant par exemple en G′, il se produira un moment dont l'effet sera de ramener ce centre de gravité vers la position G, et cela aura lieu, que G′ soit à gauche ou à droite de G ; toujours la force tendra à ramener le centre de gravité en G. On dit que G correspond à une position d'équilibre stable.

Fig. 27.



Mais G peut se trouver au-dessus du point O, ainsi que le représente la figure. Dans ce cas encore le corps se trouve en équilibre, mais s'il vient à être écarté de cette position, le centre de gravité venant en G′, la pesanteur, au lieu de le ramener à sa position primitive, l'en écarte de plus en plus jusqu'à ce que l'on soit ramené à la figure précédente.

Cette position du centre de gravité correspond à ce que l'on appelle un équilibre instable.

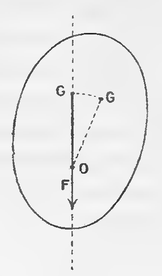


Fig. 28.

ROTATION DES CORPS AUTOUR D'UN AXE

En étudiant la rotation des corps autour d'un point, nous avons vu que, chaque fois qu'une force ne passait pas par le point fixe, cette force produisait un mouvement. Supposons maintenant que le corps soit traversé par un axe fixe, toute force parallèle à cet axe ne produit aucune rotation. Le corps peut glisser le long de l'axe si ce dernier ne lui est pas solidement relié, sinon il exercera sur cet axe une poussée qui sera transmise le long de cet axe et détruite par la réaction des points d'appui.

Si la force se trouve dans un plan perpendiculaire à l'axe, nous allons retomber dans le problème traité pour la rotation autour d'un point. En effet, prenons ce plan perpendiculaire à l'axe pour plan de la figure, l'axe sera la perpendiculaire au papier en O, il sera représenté par ce point. La force sera F par exemple et nous voyons immédiatement que tout se passera de la même façon, que la rotation ait lieu autour du point O ou autour de l'axe qui y passe perpendiculairement au plan de papier. Par conséquent, pour comprendre ce qui va se passer, nous n'avons qu'à nous reporter au problème précédent.

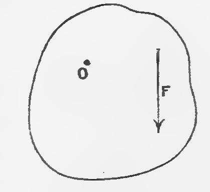


Fig. 29.

Enfin, il peut arriver que la force soit oblique par rapport à l'axe de rota-

tion. D'après les méthodes connues, nous pourrons décomposer cette force en deux autres, l'une parallèle à l'axe de rotation, l'autre perpendiculaire.

Celle qui est parallèle à l'axe ne produit aucun effet; nous savons ce qu'il advient de la seconde.

L'équilibre aura lieu lorsque la force perpendiculaire à l'axe aura amené le corps dans une position telle que cette force passe par O.

Nous allons pouvoir déduire de cette étude sur les rotations un moyen pratique de déterminer le centre de gravité d'un corps.

Fixons en effet ce corps à un axe, le corps pourra osciller autour de l'axe, mais quand il aura pris son équilibre, qu'il sera immobile, nous pourrons affirmer que le centre de gravité se trouve dans un plan vertical passant par l'axe. Nous déterminerons ce plan par des repères pris sur le corps, puis nous recommencerons une nouvelle opération en fixant le corps à l'axe dans une autre position ; nous aurons un second plan contenant le centre de gravité, ces deux plans en se coupant nous donneront une droite sur laquelle se trouve le point cherché.

Enfin, dans une troisième opération, nous déterminerons un nouveau plan qui, par sa rencontre avec la droite, fixera définitivement la position du centre de gravité du corps.

Au lieu de relier le corps à un axe de rotation, on peut le suspendre à un fil : le centre de gravité se met alors sur la verticale au point de suspension et il suffit de deux opérations pour le déterminer. Suivant les cas, on emploiera l'une ou l'autre de ces deux méthodes, en se guidant sur les facilités expérimentales.

Nous allons aussi pouvoir maintenant résoudre un autre problème. Nous avons dit plus haut que lorsque deux forces parallèles agissaient sur un corps, la résultante de ces deux forces était égale à leur somme et leur était parallèle.

Ainsi, si en deux points d'une table on dépose un poids de 2 kilogrammes et un poids de 5 kilogrammes, le poids de la table augmente de 7 kilogrammes. Mais où se trouve le point d'application de cette résultante ? Considérons le corps C soumis à l'action des deux forces A et B appliquées en a et b, où se trouve le point d'application de la résultante R. Remarquons d'abord que nous pouvons toujours admettre qu'il est sur ab perpendiculaire à A, B et R, puisque chacune des forces A, B, R peut être déplacée dans sa propre direction sans que son effet ne change.

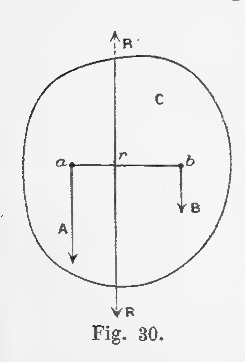


Fig. 30.

Si R est la résultante de A et B, R′ égale et de sens contraire à R fait évidemment équilibre de A et B.

Donc il suffit de chercher le point d'application r de R′ pour que A, B et R′ se fassent équilibre.

Si cela a lieu, le corps est immobile, en particulier il ne subit aucune rotation autour de r, donc les moments de A et de B par rapport à r sont les mêmes.

On a donc

$$A \times ar = B \times br.$$

ou bien

$$\frac{A}{B} = \frac{br}{ar}.$$

Ce qui veut dire que les distances de r aux points a et b doivent être inversement proportionnelles aux forces A et B ; on sait que, dans ces conditions, le point r est déterminé et peut se trouver, soit par le calcul, soit par des constructions de géométrie élémentaire.

Naturellement, le problème inverse peut se poser et généralement il se présente sous la forme suivante :

Étant donnée une force R agissant sur un corps, décomposer cette force en deux autres parallèles et appliquées en a et b.

Il peut encore arriver que l'on donne une des composantes, A par exemple, et son point d'application a. B s'obtiendra par différence R — A, b se trouve par le calcul ou par une construction graphique.

CORPS REPOSANT SUR UNE SURFACE

Considérons le cas le plus simple, celui d'un corps en contact avec une surface plane par une surface plane et soumis à l'action d'une force.

Si cette force F est parallèle au plan, le corps sera entraîné dans la direction de la force F sans que la présence de cette force n'exerce aucune action, aucune pression sur le plan P, tout se passera comme si ce plan n'existait pas. Si la force est perpendiculaire au plan, et telle que F′ par exemple, le corps ne subira aucun mouvement, l'effet de la force F′ sera annulé par la réaction du plan égale et de signe contraire à F′.

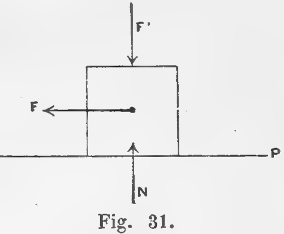


Fig. 31.

Enfin, si c'est une force F″ oblique au plan qui est en cause, elle se décompose comme on le sait en une force parallèle au plan P et une autre normale. Cette dernière sera détruite par la réaction du plan, la première produira un glissement.

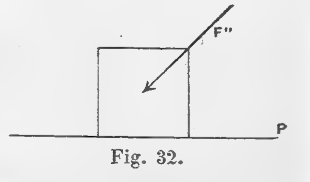
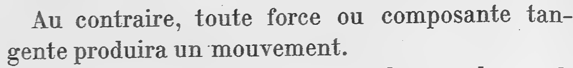


Fig. 32.

Il en résulte que pour qu'un corps, gêné dans son déplacement par un plan fixe, soit en équilibre sous l'influence d'une force ou d'un ensemble de forces, il faut que cette force ou la résultante de toutes les forces soit normale au plan. Cette résultante est alors détruite par la réaction du plan.

Ce que nous venons de dire s'applique à toute autre surface que le plan ;

considérons par exemple le corps c mobile sur la surface S, toute force F normale à la surface ne produira qu'une pression du corps sur la surface, cette pression sera détruite par la réaction normale N.



Au contraire, toute force ou composante tangente produira un mouvement.

Il n'y aura donc équilibre que lorsque la résultante des forces sera normale à la surface.

Fig. 33.

La condition que nous venons d'indiquer est nécessaire, elle n'est pas suffisante. Admettons en effet, pour simplifier les explications, que le corps n'ait qu'un point de contact avec la surface, c'est par ce point que la surface lui transmettra sa réaction, et si, comme dans le cas de la figure ci-contre, cette réaction N et la force agissante F ne se trouvent pas dans le prolongement l'une de l'autre, elles ne s'annuleront pas, mais constitueront un couple donnant lieu à une rotation du corps. Nous pouvons encore nous exprimer autrement. Puisque le corps est sollicité par la force F à se déplacer normalement au plan P, le point de contact n du corps et du plan est un point fixe ; donc, pour qu'il y ait équilibre, la force F doit passer par n, sinon il se produira un moment et une rotation, jusqu'à ce que la condition d'équilibre soit réalisée. C'est ce que l'on exprime en disant que la force F doit passer par le point de sustentation.

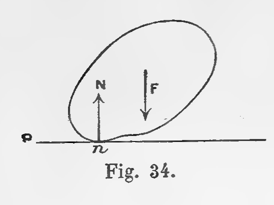


Fig. 34.

Mais souvent, au lieu d'avoir un point unique de contact entre le corps et la surface, il y en a un plus ou moins grand nombre ; quelle est alors la condition d'équilibre?

Considérons d'abord une figure plane, ABC par exemple, en contact avec la droite XY. Si une force F agissant sur le corps rencontre XY à droite du point C, il est évident, d'après ce que nous avons vu, que le moment de cette force fera tourner ABC autour du point C, le point B se soulevant et la figure exécutant sa rotation dans le sens des aiguilles d'une montre. Si la force avait passé à gauche du point B, la rotation se serait produite en sens inverse et autour de ce point B. Dans ces deux cas, il n'y aurait donc pas eu équilibre. Mais lorsque la force passera entre B et C, il ne peut plus y avoir de rotation; en effet, elle se produirait autour de C dans le sens des aiguilles d'une montre, ce à quoi le contact de B avec XY s'oppose ; de même, la rotation inverse autour de B est empêchée par le contact de C avec XY. La condition nécessaire pour l'équilibre de cette figure est donc que la force passe entre B et C. Dans ces conditions, il n'y aura pas de renversement de la figure ; la force F se décomposera alors en une force normale détruite par la réaction de XY et une force parallèle à XY qui fera glisser la figure suivant XY; pour que l'équilibre existe, il faut que la

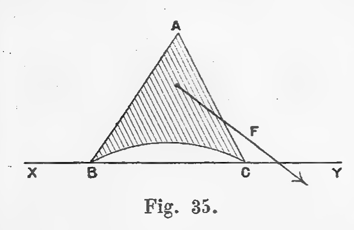


Fig. 35.

résultante des forces soit normale à XY et qu'elle passe dans la base de contact : ABC est en équilibre, A'B'C' ne l'est pas. Si maintenant nous passons à un corps solide en contact avec un plan, nous voyons que ce contact se fait par trois points au moins, soient A, B, C ces trois points. Nous savons déjà que pour éviter tout glissement la résultante des forces doit être normale à la base de sustentation ABC ; de plus, elle doit tomber dans l'intérieur de cette base. Supposons en effet qu'elle tombe au dehors, en P ; en mettant l'œil sur le prolongement de BC, nous aurions l'impression d'une figure comme ci-contre, la droite BC se projetant suivant un point, et en se reportant à ce que nous venons de dire plus haut, nous voyons que dans ces conditions le corps n'est pas en équilibre *stable*, il se renversera en tournant autour de la droite BC comme charnière.

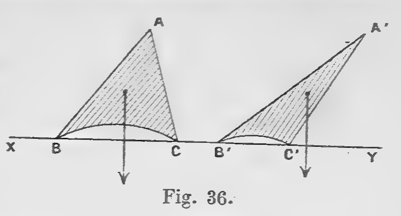


Fig. 36.

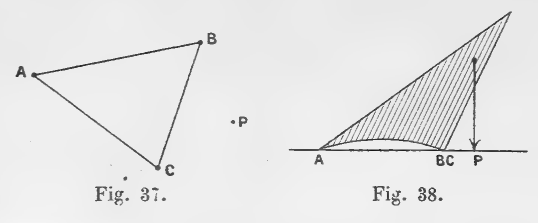


Fig. 37. Fig. 38.

En examinant successivement les rotations qui peuvent se produire autour des trois côtés du triangle, on voit que pour avoir un état d'équilibre, il faut que la résultante des forces tombe à l'intérieur de ce triangle. Si le corps est en contact avec le plan par plus de trois points, tous ces points de contact forment un polygone ABCDEF dit polygone de sustentation.

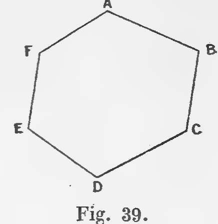


Fig. 39.

Pour que le corps soit en équilibre, il faut que la résultante des forces normales au plan de la base de sustentation passe à l'intérieur de cette base.

DYNAMIQUE

La Dynamique est certainement la partie de la Mécanique où les gens peu habitués à cette science commettent le plus d'erreurs, cherchant à prévoir ce qui se passera pour un corps en mouvement d'après les connaissances acquises sur ce corps au repos. Que de fois on entend demander quelle peut être la force produite par le choc d'un corps de poids donné, animé d'une vitesse connue ou tombant d'une hauteur déterminée. Nous allons faire voir combien l'on peut se tromper dans ces sortes de questions, où les problèmes posés n'ont souvent aucun sens.

Prenons une expérience de tous les jours : Un poids est suspendu à un fil ; si ce poids est abandonné à lui-même doucement, le fil pourra, s'il est assez résistant, ne pas se rompre ; il soutiendra ce poids dans l'espace. Mais il arri-

vera souvent qu'en abandonnant brusquement le poids après l'avoir soulevé légèrement pour détendre le fil, il y aura rupture. Ce fait est bien connu; cependant, au premier abord, on n'en voit pas l'explication; c'est toujours la même force qui agit, le poids du corps ; le fil devrait se comporter toujours de la même façon.

Voici une autre expérience encore plus frappante. Prenez une sphère pesante, attachez-y deux fils identiques, un supérieur, qui permettra de la suspendre à un point fixe, l'autre inférieur, qui pendra librement. Prenez le bout inférieur à la main et exercez de haut en bas une traction légère et graduellement croissante ; il arrivera un moment où il y aura rupture. C'est évidemment le lien supérieur qui cassera, car il supporte la traction de la main plus le poids de la sphère, le bout inférieur ne supportant que la traction.

Fig. 40.

Mais au lieu d'agir avec douceur, donnez une secousse brusque ; si le poids de la sphère est convenablement choisi, ce sera le bout inférieur qui se rompra.

Du même ordre est encore l'expérience consistant à supporter un petit bâton placé horizontalement sur des supports très fragiles et à le briser d'un coup bien appliqué au milieu sans accident pour les supports. Une foule de phénomènes analogues, étranges au premier abord, se rencontrent tous les jours, paraissant en contradiction absolue avec ce que nous avons étudié dans la statique. Un nouvel élément intervient aussitôt que les corps ne sont plus au repos; c'est l'inertie de la matière. En statique, nous n'avons jamais parlé d'inertie ; cette propriété de la matière n'y joue aucun rôle ; nous allons, au contraire, la voir prendre place au premier rang dans la dynamique, et c'est faute d'en tenir compte que certains résultats d'expérience paraissent souvent si surprenants.

Nous ne saurions assez mettre en garde les débutants contre cette source d'erreurs, ni assez leur répéter qu'un résultat acquis par l'étude d'un corps au repos perd toute sa valeur aussitôt que ce corps se met en mouvement.

TRAVAIL MÉCANIQUE

La notion de travail mécanique, non seulement domine toute la dynamique, mais aussi a complètement bouleversé la science contemporaine, depuis qu'on a découvert ses diverses transformations. Malgré son importance, quelques expérimentateurs semblent ne pas en avoir bien saisi les éléments ; aussi est-il indispensable de bien se pénétrer des conditions dans lesquelles il se produit.

Nous avons vu qu'un corps ne pouvait modifier son état de repos ou de mouvement sans l'intervention d'une cause extérieure que nous avons appelée la force. Considérons, par exemple, un corps au repos ; nous savons que, sous l'influence d'une force, il pourra prendre une vitesse croissante, ou qu'il aura une certaine accélération. On dit que pour produire cette accélération, il y a dépense de travail. Par conséquent, pour qu'il y ait production de travail mécanique, deux éléments sont indispensables :

1° Une force agissant sur un corps matériel ;

2° Un déplacement de ce corps matériel sous l'influence de la force.

Si une de ces conditions venait à disparaître, il n'y aurait plus d'accélération, plus de travail. C'est surtout la seconde qui semble avoir parfois été omise, et cependant Poncelet a beaucoup insisté sur ce point et a fait remarquer qu'une pression, quelque énergique qu'elle soit, exercée contre un mur fixe, ne donne lieu à aucune production de travail, pas plus qu'un corps pesant placé sur une table.

Évaluation du travail. — Considérons un corps se déplaçant sous l'influence d'une force, les deux conditions de production de travail sont réalisées ; comment évaluerons-nous le travail dépensé ? Il est évident que ce travail croît proportionnellement à la force, c'est-à-dire que, si la force devient deux fois, trois fois, etc., dix fois plus grande, le travail, dans de mêmes conditions de déplacement du corps, devient deux fois, trois fois, etc., dix fois plus grand, puisqu'on pourrait considérer chaque fraction de force comme agissant pour son propre compte, puis faire le total du travail obtenu.

Quant au chemin parcouru, il intervient de la même façon, car la force a le même effet pendant le premier mètre, par exemple, que pendant tous les mètres suivants, et produit le même travail.

Par conséquent, le travail croît proportionnellement à la force et au chemin parcouru ; si on a mesuré la force et le chemin à l'aide d'unités convenables, le travail s'obtient en faisant le produit des nombres trouvés.

En France, nous savons que les forces s'évaluent en kilogrammes, les longueurs en mètres ; si on a une force de 1 kilogramme produisant du travail sur une longueur de 1 mètre, ce travail produit doit être égal à l'unité. Cette unité s'appelle le kilogrammètre.

Supposons qu'une force de 25 kilogrammes s'exerce pendant un parcours de 4 mètres ; le travail produit sera

$$T = 25 \times 4 = 100 \text{ kilogrammètres.}$$

Dans ce qui précède, la force agit dans la direction du chemin parcouru, le corps est supposé libre sous l'influence de cette force, mais il arrive très souvent qu'il n'en soit plus ainsi et que la force soit oblique par rapport à la direction de propagation du corps. Les exemples en sont fréquents : il suffit de regarder un chaland halé sur un canal pour voir que la direction de la corde et, par suite, de la force, est oblique par rapport au chemin suivi par le chaland, ou bien de comparer la direction du vent à la route suivie par un bateau pour voir combien on est loin du parallélisme.

Dans ces conditions, il faut faire une décomposition de forces en deux autres, l'une parallèle à la direction du chemin parcouru, la seconde perpendiculaire. Par exemple, sur la figure, la force F agit sur le corps A obliquement au chemin parcouru XY. On la décompose

Fig. 41.

suivant la méthode connue en f, agissant dans la direction de propagation, et f, perpendiculaire à cette direction; f' ne produit aucun travail, car il est évident que si cette force agissait seule, le corps A, astreint à rester sur XY, ne bougerait pas. C'est donc f seul qu'il faut considérer, et quand le corps A a parcouru une longueur de chemin l sur XY, le travail dépensé pour cela aura été

$$T = l \times f.$$

Au lieu de faire une construction et de mesurer f, on peut le calculer, si l'on connaît l'angle ω que fait la force avec la direction du chemin parcouru, car on sait que l'on a

$$f = F \cos \omega.$$

d'où, en remplaçant f par cette valeur dans la formule du travail,

$$T = l \times F \times \cos \omega.$$

ce que l'on peut exprimer en disant :

Le travail fourni par une force oblique au chemin parcouru est égal au produit de ces deux quantités multiplié par le cosinus de l'angle qu'ils font entre eux.

Nous venons d'envisager le cas où la force agissante est dirigée dans le sens du mouvement. Le travail qui en résulte est dit alors travail moteur. Mais il arrive aussi que la force soit dirigée en sens inverse et qu'elle tende à s'opposer au déplacement du corps; elle fournit alors un travail résistant. La conception de ce travail résistant deviendra plus claire par la lecture de la suite.

Cas où le chemin n'est pas rectiligne. — Il arrive souvent que le corps ait à parcourir un chemin déterminé non parallèle à la force et parfois non rectiligne; cela aura lieu, par exemple, chaque fois qu'un corps soumis à la pesanteur ne sera pas en chute libre, mais descendra sur un plan incliné ou le long d'une glissière de forme quelconque. Dans tous les cas où la force reste constante en grandeur et en direction, l'évaluation du travail est très simple.

Nous avons vu que, lorsque la force n'est pas parallèle au chemin, le travail s'obtient en multipliant la longueur de ce chemin parcouru par la projection de la force sur lui. Ce travail s'exprime par

$$T = l \times F \cos \omega.$$

Fig. 42.

Mais il est évident qu'au lieu de projeter la force sur le chemin, on peut, comme sur la figure, projeter le chemin sur la force, car on trouvera encore pour le travail

$$T = l F \cos \omega.$$

Cela dit, considérons un chemin polygonal ABCDE parcouru par un corps soumis à l'influence de la force F, constante en grandeur et en direction ; le travail, au bout du parcours ABCDE, sera :

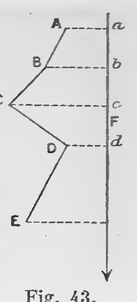


Fig. 43.

$$T = (F \times ab) + (F \times bc + \ldots,$$

ou bien

$$T = F(ab + bc + \ldots).$$

C'est-à-dire que le travail s'obtiendra en multipliant la force par la projection sur cette force du chemin brisé ABCDE.

Si, au lieu d'avoir un chemin polygonal, on avait un chemin curviligne AB, le travail total, pour le parcours AB, serait encore

$$T = F \times Ab.$$

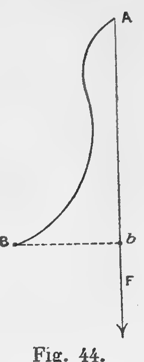


Fig. 44.

En effet, on n'a tenu aucun compte de la grandeur des côtés du polygone ABCDE, on peut les supposer de plus en plus petits et de plus en plus nombreux ; la même règle s'applique à un polygone à côtés infiniment petits, c'est-à-dire à une courbe.

Travail en fonction de la vitesse et du temps. — Nous avons évalué le travail au moyen de la force et du chemin parcouru par le point d'application de cette force. Il peut, dans certains cas, y avoir intérêt à ne pas introduire le chemin parcouru dans l'expression du travail ; il est aisé d'y arriver. Le chemin parcouru au bout du temps t est vt ; par conséquent, le travail est

$$T = Fvt.$$

Si la force faisait avec le chemin un angle ω, le travail s'exprimerait par

$$T = Fvt \cos \omega.$$

TRANSFORMATION DU TRAVAIL EN FORCE VIVE

Nous venons de voir un corps libre se mettre en mouvement sous l'influence d'une force, nous avons dit que cette force donnait lieu à une production de travail, mais il y a un autre point très important qu'il faut considérer maintenant. Le corps était au repos ; après la production de travail, il est animé d'une vitesse plus ou moins grande suivant son poids, suivant la quantité de travail fourni. Comment ces divers éléments sont-ils liés entre eux ? Prenons un exemple idéal qu'il n'est pas possible de réaliser rigoureusement, mais aux défauts duquel on peut suppléer par l'imagination.

Soit un wagon absolument mobile sur des rails, c'est-à-dire ne subissant aucune résistance passive de la part de l'air ou des frottements de ses divers organes. Ce wagon est au repos et nous allons chercher à le mettre en mou-

vement en le poussant devant nous. Pour cela, il faudra exercer un certain effort et, le wagon avançant, nous dépenserons du travail pendant que sa vitesse ira en augmentant. Ce wagon ayant acquis de la vitesse, la conservera si nous cessons d'agir sur lui ; il possède ce que l'on appelle de la force vive.

L'expérience même la plus grossière permet de constater que, pour amener un wagon à une certaine vitesse, il faudra dépenser un travail d'autant plus considérable que le wagon est plus lourd.

Ce n'est qu'une étude théorique semée de grosses difficultés, qui a permis aux mécaniciens d'établir la relation exacte existant entre le travail dépensé, la masse du corps mis en mouvement et la vitesse à la fin de l'opération. Cette relation est exprimée par la formule

$$T = \frac{1}{2} mv^2.$$

Le deuxième terme de cette égalité exprime ce que nous avons appelé la force vive : c'est la moitié de la masse du corps multipliée par le carré de sa vitesse. C'est sous cette forme de force vive, que le travail dépensé est pour ainsi dire emmagasiné dans le corps en mouvement, et elle y restera tant qu'une cause extérieure ne viendra pas, suivant le principe de Newton, modifier cet état de mouvement.

Il peut arriver qu'un corps ayant déjà une certaine vitesse V, on désire l'augmenter et la pousser jusqu'à une autre valeur V' ; la force vive passera alors de $\frac{1}{2}mv^2$ à $\frac{1}{2}mv'^2$ et pour arriver à ce résultat on aura dépensé une quantité de travail donnée par

$$T = \frac{1}{2} mv'^2 - \frac{1}{2} mv^2.$$

En examinant avec soin la formule liant le travail à la force vive, on conçoit pourquoi, même en l'absence de toute résistance, par suite du seul fait de l'inertie, il faut exercer des efforts énormes pour animer de quelque vitesse les corps pesants, pourquoi, par exemple, on écarte plus difficilement de la verticale un pendule lourd qu'un pendule léger, et pourquoi ces déplacements ne peuvent se produire brusquement. Considérons en effet un tel pendule dans sa position d'équilibre ; lorsque nous chercherons à le déplacer légèrement, nous n'aurons pas à vaincre de grande résistance provenant de l'attraction terrestre qui s'exerce suivant la verticale, tandis que notre poussée sera horizontale, mais le pendule prendra une certaine vitesse ; si sa masse est considérable, il aura une grande force vive dont l'acquisition aura nécessité une dépense de travail et par suite une force d'autant plus grande que la masse du pendule est plus importante. On conçoit aussi que plus on désirera un déplacement rapide, c'est-à-dire une grande vitesse, plus le travail dépensé et l'effort exercé devront être considérables.

TRANSFORMATION DE FORCE VIVE EN TRAVAIL

Un wagon, lancé sur une voie horizontale, conservera sa force vive une fois que la force extérieure, qui a servi à le mettre en mouvement, aura cessé d'agir. Il sera inutile de chercher à l'arrêter instantanément, il en résulterait des chocs dont nous parlerons plus loin. Pour le faire revenir au repos, il faudra lui appliquer une force en sens inverse de son mouvement; cette force proviendra d'un obstacle placé devant le wagon qui l'entraînera. Le wagon exercera contre cet obstacle exactement la même force que celle qu'il reçoit lui-même de sa part, d'après le principe d'égalité de l'action et de la réaction; par conséquent, le wagon communique du travail à l'obstacle, et fait une dépense empruntée à sa force vive. Il s'arrêtera lorsqu'il aura usé toute cette force vive, qui se sera transformée en travail mécanique, inversement à ce que nous avons vu précédemment.

Si la force ainsi opposée au wagon est petite, il faudra pour l'arrêter un parcours très long; si elle est grande, ce parcours sera petit; car la quantité de travail à produire étant la même, il faut que le produit de la force exercée par le wagon contre l'obstacle par le déplacement de cet obstacle ait la même valeur. Si l'une de ces quantités diminue, par compensation, l'autre doit augmenter dans la même proportion. On conçoit, dès lors, qu'aucune force, quelque grande qu'elle soit, ne pourra produire un arrêt instantané; si le wagon heurte un obstacle fixe, il y aura un choc, et au point de contact une déformation des deux corps permettra au wagon, malgré la force énorme qui s'opposera à son mouvement, de faire un léger parcours, suffisant pour dépenser sa force vive sous forme de travail mécanique.

Dans tous les cas, en observant avec soin ce qui se passe, nous pourrons voir, lors du mouvement que prend un corps, du travail s'emmagasiner sous forme de force vive, puis, pendant le retour au repos, la transformation inverse se produire.

Un des exemples les plus frappants de cette transformation se rencontre dans l'oscillation d'un pendule autour de la verticale de son point de suspension. Prenons le pendule A suspendu au point O et écartons-le en A′ d'un angle α, puis abandonnons-le à lui-même en le laissant osciller. Sous l'influence de la pesanteur, il descend de A′ en A; pendant tout ce temps, il y a dépense de travail mécanique; aussi voyons-nous la vitesse du pendule aller en augmentant; elle est nulle au départ A′, elle atteint sa valeur maxima en A. Le travail a produit de la force vive. Mais nous savons aussi qu'arrivé en A, position d'équilibre où nulle force ne tend à déplacer le pendule, ce pendule ne s'arrêtera pas, il continue son chemin avec sa vitesse acquise et remonte en A″ à une hauteur égale à celle de A′. Pendant le mouvement de A en A″, l'attraction terrestre tend à s'opposer au déplacement du corps, sa vitesse va

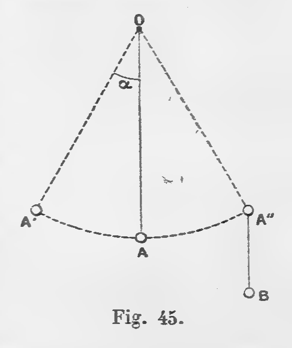


Fig. 45.

en diminuant, sa force vive s'annule peu à peu. Pendant ce temps, le pendule a dépensé du travail, car si nous remplacions, par la pensée, l'attraction terrestre par un petit corps B agissant par son poids sur A, ce corps B aurait été soulevé par le pendule, qui, pour produire cet effet, aurait transmis à B un certain travail. On voit que dans ces oscillations successives du pendule, il y a toujours transformation de travail en force vive pendant que le pendule se rapproche de la verticale et transformation inverse pendant qu'il s'en éloigne.

Il est maintenant facile de comprendre pourquoi un fil supportant un poids ne se comporte pas de la même façon, suivant que le poids produit une extension progressive ou est abandonné brusquement à lui-même.

Prenons un fil attaché en A à un point fixe et supportant en B un corps pesant. Ce fil a toujours une certaine élasticité, il s'allongera sous la traction qu'il subit et le point B viendra en B′; à ce moment, le poids du corps est équilibré par la résistance du fil à la rupture. Plaçons la main sous le poids et soulevons-le jusqu'en B, puis abandonnons-le brusquement à lui-même; nous avons dit qu'il arrivait souvent que le fil se rompe. En effet, en passant de B en B′, l'attraction terrestre sur le corps B est supérieure à la traction exercée par le fil; le corps B va donc pendant ce trajet emmagasiner du travail sous forme de force vive, il arrivera en B′ avec une certaine vitesse, comme le pendule oscillant arrive à la verticale. Le corps pesant ne s'arrêtera pas à la position d'équilibre B′, il la dépassera jusqu'en un point B″, le parcours B′B″ donnant lieu à une transformation de force vive en travail. On voit par conséquent que le fil AB subira un allongement plus considérable que lorsque le corps B est abandonné doucement à lui-même, passant progressivement de B à B′; il pourra donc arriver qu'il y ait rupture.

A

B

B′

B″

Fig. 46.

Pourquoi maintenant, dans l'expérience de la sphère, est-ce le brin inférieur qui casse quand on lui donne une secousse brusque? Une force quelconque exerçant son action sur la sphère tend à la déplacer, mais ce déplacement exige un certain temps, l'inertie de la sphère n'est pas vaincue instantanément, et le mouvement se produit d'autant moins vite que la force agissante est plus faible. Or, il peut arriver, si l'expérience est bien réglée, que la secousse nécessaire pour casser le fil ne produise pas de traction suffisante pour entraîner la sphère avec assez de vitesse; cette sphère restant en arrière, le fil qui l'entraîne casse avant d'avoir produit un déplacement appréciable, le lien supérieur ne sera donc pas étendu et résistera.

CHOC

Nous avons dit que lorsqu'au lieu d'arrêter un corps en mouvement d'une façon progressive, en lui faisant dépenser doucement le travail emmagasiné sous forme de force vive, on lui opposait brusquement un obstacle, il y avait choc.

Il y a à considérer deux cas, suivant que l'obstacle est fixe ou est mobile. Supposons d'abord l'obstacle fixe. Au moment du contact du corps mobile

et de l'obstacle, le corps mobile sera soumis à l'influence d'une force de sens contraire à son mouvement de propagation ; il ne s'arrêtera pas brusquement, mais, continuant son chemin, il en résultera une déformation au contact des deux corps. Il y aura donc dépense de travail, comme dans le cas de l'arrêt progressif du wagon, seulement le chemin parcouru sera en général très faible et, par conséquent, les forces au contact des deux corps très grandes.

Il se produira alors divers phénomènes. Si les corps en jeu sont mous, ou si l'un d'eux au moins l'est, sa déformation sera permanente. Supposons par exemple que l'on donne un coup de marteau sur un morceau de plomb, le plomb se déforme pendant la restitution du travail, et cette déformation persiste.

Si le corps n'est pas mou, il se déformera élastiquement, puis, arrivé à son maximum de déformation, si les forces en jeu n'ont pas dépassé certaines limites, le corps reprendra sa forme primitive, le travail se restituant de nouveau en force vive, mais avec une direction inverse de la vitesse. Par exemple, une balle élastique tombe d'une certaine hauteur sur un sol rigide ; au moment du contact, elle se déformera jusqu'à ce que toute sa force vive ait été transformée en travail, puis, tendant à reprendre sa forme primitive, elle réagira contre le sol avec une force égale à celle qui a été nécessaire pour la déformer et rebondira à une hauteur égale à celle d'où elle est tombée, si aucune cause étrangère ne trouble le phénomène. Dans un autre cas, prenons un corps et lançons-le contre un ressort ; au moment du contact, le ressort se déformera avec dépense de travail, puis renverra le projectile en sens inverse de sa propagation primitive : on peut dire que le ressort emmagasine la force vive sous forme de travail pour la rendre après coup.

Des exemples de chocs de cette nature abondent ; il suffira de citer la balle des enfants ou le billard. Mais il arrive que le choc soit violent, ou que les organes choqués ne soient pas construits pour cet usage, alors les limites d'élasticité sont dépassées et on arrive à la rupture.

On comprend maintenant pourquoi il est impossible de dire quelle est la force produite par le choc d'un corps, quoique connaissant sa masse et sa vitesse ; cette force dépend des conditions de résistance entre le corps choqué et le corps choquant. Si un de ces corps au moins est relativement facilement déformable, le chemin parcouru par le mobile pendant le choc sera grand et l'effort exercé faible. Ce même mobile rencontrant un corps plus rigide, il en résulte cette remarque au premier abord paradoxale que, lorsqu'un corps choquant a heurté un obstacle, l'étendue du dégât constaté après le choc est d'autant plus grande que l'effort exercé au contact des deux corps a été plus petit.

En résumé, lors d'un choc, on peut dire qu'il s'est dépensé un travail d'un nombre donné de kilogrammètres, mais du travail emmagasiné il est absolument impossible de déduire la force qui s'est produite au moment du choc, un problème ainsi posé n'a aucun sens.

Dans le second cas, le corps choqué est mobile, la force vive du corps choquant sert à des déformations au point de contact comme dans le cas précédent, mais en plus elle se transmet en partie au corps choqué qui prend une certaine vitesse.

Les effets du choc sur le corps choqué se divisent donc en effets locaux, destructeurs ou non suivant la constitution de la matière des corps, et en effets de projection. La répartition entre ces deux effets dépend de la masse des corps en jeu.

Voyons d'abord ce qui se passe quand la masse du corps choqué varie. Pour cela, supposons, bien entendu, que le choc vienne toujours d'un même corps animé d'une même vitesse. Le calcul et l'expérience font voir que lorsque la masse du corps choqué augmente, les effets destructeurs locaux augmentent, c'est-à-dire que si le choc porte sur un très petit corps, ce corps sera vivement projeté dans le sens du choc, mais sans déformation sensible. Si au contraire ce corps choqué a une grande masse, il se déplacera fort peu, d'autant moins qu'il est plus lourd, mais au point de contact du choc il y aura une déformation de plus en plus grande. Voici un exemple de ce fait : prenons un marteau et frappons-en divers corps, nous verrons que de petits clous seront facilement enfoncés dans le bois sans se déformer ; qu'un choc horizontal contre une petite bille la projette sans l'endommager. Mais à mesure que nous prendrons des clous ou des corps de plus en plus gros, nous verrons que les clous s'enfoncent plus difficilement avec le même marteau, que leur tête se déforme plus rapidement, et qu'en voulant projeter par choc des pierres de plus en plus grosses comme on le faisait tout à l'heure des petites billes, elles se déplacent de plus en plus difficilement et finissent même par se briser plutôt que d'entrer en mouvement.

Naturellement, nous allons observer l'inverse, si, passant du corps choqué au corps choquant, nous faisons varier la masse de ce dernier.

Quand cette masse sera faible, les effets de projection seront aussi faibles, les effets au contact relativement grands ; si la masse augmente, les effets de projection augmenteront aussi par rapport aux effets au contact. Ainsi, pour enfoncer un clou, un marteau lourd donne de bons effets ; un marteau léger déformera la tête du clou avant de l'enfoncer, aussi sera-t-il avantageux pour river. De même, quand on veut enfoncer des pieux au mouton, un mouton léger déforme les têtes de pieux, les brise et donne un mauvais usage ; un mouton lourd permet au contraire de les battre impunément, il sont chassés devant lui.

En résumé, chaque fois que l'on voudra projeter un corps, il faudra le choquer avec un corps lourd ; si l'on veut y produire une déformation locale, il faut le choquer avec un corps léger ; autrement dit, pour renverser un mur, il faut un projectile lourd ; pour le percer, un projectile léger et rapide.

Les effets locaux des chocs entre corps mobiles varient avec la nature des matériaux, comme dans le cas des chocs contre corps fixes. Ceci a une très grande importance pratique.

Bien entendu, il faut éviter les chocs où les limites d'élasticité sont dépassées, car il en résulte une destruction immédiate des corps, mais, en dehors de cela, il faut éviter les chocs entre matières non élastiques, pour cause d'usure des corps et pour cause d'épargne de travail.

Nous avons vu plus haut que lors des chocs entre corps non parfaitement élastiques, il en résultait des déformations permanentes absorbant du tra-

vail sans le rendre en force vive; par conséquent, chaque fois que des corps juxtaposés devront servir à transmettre du travail, il faudra éviter ces chocs. Supposons par exemple un attelage traînant une voiture; la traction n'est jamais continue, elle se produit souvent par une série de chocs; si ces chocs servent à des déformations permanentes, une partie du travail fourni par l'attelage est dépensé en pure perte. Si, au contraire, les liens sont élastiques, sous l'influence d'une traction brusque ils s'allongeront, emmagasineront du travail, qu'ils rendront sous forme de force vive par une traction douce sur le véhicule. Ces faits, soumis à l'expérience par M. Marey, ont reçu une confirmation éclatante; dans toute transmission de travail, il faut absolument éviter des chocs brusques.

FROTTEMENT

En étudiant la transformation du travail en force vive, nous avons vu que tout le travail dépensé devait se retrouver intégralement sous forme de force vive. Il arrive souvent qu'il n'en soit pas ainsi, et que l'on trouve un certain déficit dans la force vive obtenue par une certaine dépense de travail. Nous verrons dans la suite que, lorsque ce phénomène se présente, il est accompagné d'actions calorifiques, électriques ou autres, qui ont absorbé pour leur production une fraction du travail mécanique. C'est ainsi, par exemple, que, lorsqu'un corps mobile se déplace au contact d'un autre corps fixe, le corps mobile n'acquiert pas toute la force vive correspondant au travail dépensé et que l'on voit se produire une élévation de température. Le corps mobile a éprouvé dans son mouvement une certaine résistance, et tout se passe comme s'il était soumis, outre la force motrice, à une force dirigée en sens inverse dont le travail est à retrancher du travail moteur. Cette force résistante est due à ce que l'on appelle le frottement des corps.

De quels éléments dépend cette résistance de frottement? L'expérience a fait voir qu'elle variait avec la nature des surfaces en contact, et qu'en outre il n'y avait que la grandeur de la réaction normale N qui ait quelque influence. Prenons deux corps de nature déterminée, appliquons-les l'un contre l'autre et opérons un glissement, la force nécessaire pour le produire sera proportionnelle à la réaction normale N, quelle que soit l'étendue des surfaces en contact. Pour chaque espèce de corps, il faudra, pour avoir la résistance au glissement, multiplier N par un certain nombre α donné par l'expérience et appelé coefficient de frottement.

Par exemple, le coefficient de frottement du bois sur le bois est 0,36; si deux morceaux de bois sont appliqués l'un contre l'autre par des surfaces planes avec une force de 10 kilogrammes, l'effort nécessaire pour les faire glisser l'un sur l'autre sera $10 \times 0{,}36 = 3^{kgr},6$. Que va-t-il se passer lorsqu'une force sera appliquée à un corps non plus absolument libre, mais assujetti à glisser sur un autre corps fixe? Il faudra évidemment retrancher de la force agissante la force, résistance passive, due au frottement. Il se produira divers cas. Soit f la valeur du frottement, si la force agissante n'atteint pas f, le corps restera au repos. Si elle a une valeur F supérieure à f, le corps prendra un mouvement uniformément accéléré sous l'action d'une résultante $F\text{-}f$. Si, à

un moment donné F devient égal à f, le mouvement du corps sera uniforme, la force F ne donnera plus au corps aucune accélération, tout le travail qu'elle produira sera absorbé au fur et à mesure par le frottement dont la force est dirigée en sens contraire de F.

Il faut ajouter que le coefficient de frottement ne dépend pas seulement de la nature des corps, et lorsque, plus haut, j'ai dit que le coefficient de frottement du bois sur le bois était 0,36, cela voulait dire qu'il était tel dans les conditions de l'expérience. Il est évident, en effet, que la nature des surfaces a une importance capitale : deux morceaux de fer venus de fonte ne glisseront pas l'un contre l'autre comme ils le feront après polissage. De plus, il est bien connu qu'en introduisant entre les deux corps frottants un troisième corps dit lubrifiant, on modifie complètement les conditions de glissement. Les nombres donnés dans les tables de coefficients ne s'appliquent qu'au cas de l'expérience à l'aide de laquelle ils ont été déterminés, et ne peuvent donner qu'une approximation pour les autres cas, avec la condition de se mettre autant que possible dans les conditions de la première détermination.

Il n'y a pas que le frottement de glissement qui se rencontre comme résistance passive ; nous avons encore d'autres causes très importantes, parmi lesquelles le frottement de roulement et la résistance des fluides.

Quand un corps rond, cylindre, sphère, etc., roule sur un plan par exemple, au premier abord on ne voit pas d'où peut provenir une résistance passive ; il est pourtant d'expérience courante qu'une bille lancée sur le plan le plus parfait finit par s'arrêter, plus ou moins vite suivant la nature des surfaces.

En réfléchissant à ce fait, il est évident que, par suite du poids du corps roulant, il se produit à la surface du plan une petite dépression momentanée. Aucun corps solide n'est absolument rigide, et la sphère comprimant le plan en un point se creuse pour ainsi dire une petite loge au fond de laquelle elle repose.

Si la bille vient à rouler, elle rencontre sans cesse devant elle un petit talus qu'elle est obligée de surmonter en l'écrasant ; par suite, elle produit du travail en dépensant sa force vive, elle finit par s'arrêter si elle est libre, ou bien, si elle est soumise à l'action d'une force agissante, cette force doit dépenser sans cesse du travail absorbé au fur et à mesure par le frottement de roulement pour entretenir le mouvement.

Il est impossible de donner pour le frottement de roulement des lois générales comme celles que nous avons données pour le frottement de glissement. Ce n'est pas seulement la nature des surfaces qui intervient dans le roulement, mais aussi leur forme. Malgré les nombreuses expériences faites à cet égard, il faut dans chaque cas particulier déterminer les forces passives dues au roulement.

ROTATION DES CORPS AUTOUR D'UN AXE

Moment d'inertie. — Nous avons vu quelle était l'influence de l'inertie de la matière sur le mouvement des corps et la transformation du travail

mécanique en force vive. Mais jusqu'ici nous avons supposé les corps animés d'un mouvement de translation, c'est-à-dire ayant la même vitesse en tous leurs points. Dans ce cas, la force vive totale du corps, somme des forces vives de toutes les parties dans lesquelles on pourrait le diviser, est égale au carré de la vitesse multiplié par la moitié de la masse. Mais supposons que nous ayons un corps composé de diverses parties animées de vitesses différentes; nous exprimerons pour chacune de ces parties la force vive comme nous l'avons fait précédemment. La force vive totale s'obtiendra en ajoutant des forces vives partielles, mais elle ne s'exprimera plus aussi simplement; dans chaque cas particulier, on aura une somme d'un plus ou moins grand nombre de termes correspondant aux différentes vitesses.

En particulier, quand un corps tourne autour d'une axe, ses divers points n'ont pas la même vitesse, nous allons voir cependant que la force vive totale du corps s'exprime encore d'une façon simple en faisant intervenir ce que l'on appelle le moment d'inertie du corps.

Considérons un axe de rotation perpendiculaire au plan du papier en O et un corps pouvant tourner autour de cet axe sous l'influence d'une certaine force F. Nous allons d'abord chercher quel est le travail dépensé par cette force F ; pour cela, nous supposerons que pendant la rotation la force F ne varie pas de grandeur et reste à une distance constante de l'axe de rotation O. Soit d cette distance. Nous savons, par l'étude de la géométrie élémentaire, que, le corps tournant d'un angle θ, le point d'appui de la force F se déplace d'une quantité $\theta \times d$; c'est le chemin parcouru par la force; donc le travail fourni est exprimé par $\theta \times d \times F$, et comme $F \times d$ désigne ce que l'on appelle le moment de la force, le travail est $\theta \times M$. Donc, on peut dire que lorsqu'une force F fait tourner un corps autour d'un axe, le travail dépensé est égal au moment de la force multiplié par l'angle de rotation.

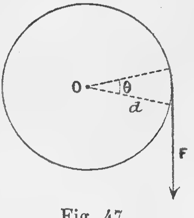


Fig. 47.

Nous avons implicitement supposé la force F perpendiculaire au rayon d; s'il n'en était pas ainsi, il faudrait la décomposer en deux autres, l'une située dans le prolongement du rayon et qui n'aurait aucune action sur la rotation, et l'autre, perpendiculaire au rayon, qui se ramènerait au cas précédent.

Cherchons maintenant l'expression de la force vive acquise par le corps.

Supposons d'abord que toute la matière du corps se trouve répartie sur le cercle de rayon d, le corps ayant au moment considéré une vitesse angulaire ω ; la vitesse linéaire de tous les points situés à la distance d de l'axe serait $\omega \times d$, par conséquent, la force vive de la masse M du corps serait $\frac{1}{2} M\omega^2 d^2$ ou $\frac{1}{2} Md^2 \times \omega^2$. Le terme Md^2 est ce que l'on appelle le moment d'inertie du corps autour de l'axe O et l'on voit que dans le cas de la rotation la force vive du corps est égale à la moitié du produit du moment d'inertie par le carré de la vitesse angulaire. Cette formule a une analogie absolue avec celle que nous

connaissons pour la translation des corps, la vitesse linéaire est remplacée par la vitesse angulaire, la masse par le moment d'inertie.

Nous avons considéré le cas où toute la masse du corps tournant était à la distance d de l'axe ; quand il n'en est plus ainsi, qu'il y a des masses à des distances d, d' d'', etc., la vitesse angulaire étant la même pour toutes les parties du corps, la force vive se représente par

$$\frac{1}{2}\,\omega^2[\mathrm{M}d^2+\mathrm{M}'d'^2+\mathrm{M}''d''^2+\ldots..],$$

et c'est le terme entre parenthèses, que l'on désigne par I, qui est le moment d'inertie du corps autour de l'axe considéré. Ce moment d'inertie s'obtient suivant les cas par un calcul plus ou moins compliqué ou par l'expérience, mais, une fois qu'on l'a, la force vive du corps pour une vitesse angulaire donnée est égale à

$$\frac{1}{2}\,\mathrm{I}\,\omega^2.$$

Nous voyons que, pour un corps donné tournant autour d'un axe, la vitesse angulaire croît avec la quantité de travail dépensée par le moment moteur, ce qui se conçoit aisément, mais de plus nous voyons aussi que le moment moteur restant constant, la force vive acquise devant être la même, la vitesse angulaire sera plus ou moins grande suivant le moment d'inertie du corps considéré ; si ce moment d'inertie est important, la vitesse angulaire sera faible ; s'il est négligeable, elle sera grande. Ainsi, un volant de machine tournant avec une certaine lenteur possède cependant une force vive considérable, grâce à son grand moment d'inertie ; une toupie d'enfant tournant à une grande vitesse n'exige qu'une faible dépense de travail, son petit moment d'inertie ne lui donnant, même à cette vitesse, que peu de force vive.

Nous voyons aussi la différence considérable qu'il y a entre la masse d'un corps et son moment d'inertie. Ce dernier élément dépend en effet de sa masse, mais aussi de sa forme et de la position de l'axe de rotation ; plus une quantité de matière sera éloignée de cet axe de rotation, plus le terme $\mathrm{M}d^2$ correspondant sera important et plus le moment d'inertie sera grand ; aussi, lorsqu'on désire augmenter le moment d'inertie d'un corps en rotation, on éloigne la matière dont il est constitué de l'axe de rotation ; dans un volant de machine, par exemple, cette matière est placée dans la couronne du volant, on ne réserve pour les rayons que ce qui est indispensable pour maintenir cette couronne. Si l'on arrive pendant la rotation d'un corps à modifier la valeur du moment d'inertie, la vitesse de rotation se modifie en sens inverse pour maintenir la force vive constante, si toutefois le corps n'est soumis à aucun moment moteur extérieur à lui. Ainsi, un acrobate se lance pour faire ce que l'on appelle le saut périlleux : ses jambes sont étendues, ses bras aussi, il tourne lentement dans l'espace, car son moment d'inertie est grand. Tout à coup, on le voit replier bras et jambes pour rapprocher sa matière de l'axe autour duquel il tourne tout en se déplaçant dans l'espace, et aussitôt sa

vitesse de rotation s'accélère. Quand il veut la modérer en arrivant à la verticale, il se met de nouveau dans l'extension.

Maintenant que nous connaissons les effets de l'inertie de la matière, nous pouvons aussi comprendre ce que l'on appelle la force centrifuge.

Considérons un corps de petit volume A tournant autour d'un axe de rotation O, la vitesse du corps A est perpendiculaire à la direction du rayon AO, et si le corps A était libre il continuerait son chemin en ligne droite suivant la direction AX; mais le lien rigide AO l'empêche de s'éloigner du centre O en exerçant sur lui une certaine traction.

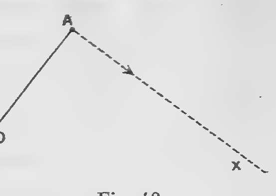


Fig. 48.

A cette traction correspond une réaction; c'est cette réaction qui constitue la force centrifuge, la traction étant elle-même la force centripète. Si l'on vient à couper le lien qui reliait A au centre O, force centripète et force centrifuge disparaissent et le corps se déplace suivant la tangente AX au cercle qu'il décrivait précédemment.

MACHINES

Il existe un certain nombre de dispositifs connus sous le nom de machines. Ces machines sont destinées à transformer du travail mécanique. On démontre en effet que dans toutes les transformations que peut subir le travail mécanique à l'aide de ces dispositifs, sa valeur reste constante. Il pourra arriver qu'à l'aide de faibles efforts on produise des forces énormes, ou que le petit déplacement d'un organe donne lieu à un mouvement d'une amplitude considérable; mais de toute façon, en évaluant le travail mécanique fourni à la machine et celui qu'elle rend, on trouvera toujours la même valeur. La lecture de ce qui suit rendra ceci plus clair.

Le nombre des machines usitées en mécanique appliquée est extrêmement considérable, mais la plupart d'entre elles n'ont aucun intérêt pour la mécanique animale. Nous nous contenterons de décrire celles dont on pourra trouver des applications dans l'étude du corps de l'homme et des animaux. Ces machines simples sont les poulies, le levier et le coin.

Poulie.

Dans la traction à l'aide de cordes, il arrive souvent que la force ne puisse s'exercer dans la direction à faire parcourir au corps; il en est ainsi par exemple lorsqu'on veut hisser un poids à une hauteur plus grande que celle où l'on se trouve. On replie alors la corde autour d'un point fixe et il est facile de concevoir comment le mouvement se transforme. En adoptant ce procédé simple, il en résulte au point de renvoi un frottement considérable et une usure de la corde. On évite ces inconvénients à l'aide de la poulie. On démontre que le frottement n'est ainsi que diminué, car il subsiste un frottement de l'axe et une résistance spéciale due à ce que l'on appelle la

Fig. 49.

raideur de la corde. On constate en effet par l'expérience qu'en cherchant à soulever le même poids R à l'aide de la même poulie, il faut des forces différentes suivant la corde employée. Un examen même grossier fait voir que F est d'autant plus grand que la corde est plus raide; ainsi des cordes neuves exigent plus de force que des vieilles. Cela tient à ce que, par suite de leur rigidité, les cordes ne s'appliquent pas exactement sur la poulie au commencement du contact, la distance AO est plus grande que BO, et comme les forces F et R interviennent par leur moment par rapport au point O, dans la rotation de la poulie, F doit être d'autant plus grand que AO l'est, c'est-à-dire que la corde a plus de raideur.

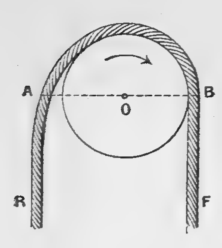


Fig. 50.

A part ces frottements que l'on peut beaucoup diminuer en graissant bien l'axe et prenant une corde souple, la force motrice se transmet intégralement, l'effet sur le brin résistant est sensiblement le même que si la traction se faisait directement.

Mais la poulie peut s'employer d'une façon différente; en effet, renversons-la et rendons fixe un des bouts O de la corde, la traction F se faisant de bas en haut et le poids à soulever R étant suspendu à la poulie.

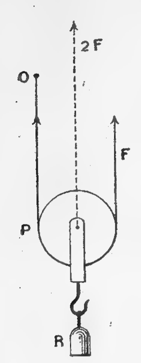


Fig. 51.

Abstraction faite des frottements, le brin PO est soumis à une force F se transmettant directement comme précédemment. Nous savons que la composante de ces deux forces leur est parallèle et égale à 2 F, c'est cette force 2 F qui fait équilibre au poids R.

Par conséquent, à l'aide de cette disposition on peut soulever un poids sensiblement double à la force motrice.

Il ne peut y avoir ni perte ni gain de travail, le travail fourni par F doit se transmettre intégralement à R; par conséquent, comme R a une valeur double de F, le chemin parcouru par R doit être moitié de celui parcouru par F.

On exprime cela en disant que ce qui se gagne en force se perd en chemin parcouru.

Si l'on disposait d'une force considérable et que l'on veuille, contrairement au cas précédent, gagner du chemin, on renverserait l'appareil, appliquant F à la poulie et suspendant R au bout de corde libre.

On peut ne pas se borner à une seule poulie mobile, mais se servir de la première pour exercer une traction sur le bout libre d'une deuxième poulie, et ainsi de suite; chaque poulie aura pour effet de doubler la force, en diminuant dans la même proportion le chemin parcouru.

Ainsi la figure 52 représente une association de trois poulies; cela suffit à donner une force huit fois plus considérable que la force motrice. On conçoit combien sont considérables les forces que l'on peut développer ainsi.

Cette combinaison est un peu encombrante; il y en a une autre, dans laquelle il n'y a qu'un point fixe, toutes les poulies étant montées sur deux

axes, mais elle ne permet pas de multiplier la force aussi rapidement que par la méthode précédente.

Prenons, par exemple, le cas de la figure 53 : il y a trois poulies sur l'axe supérieur et trois poulies sur l'axe inférieur. La corde est attachée au crochet fixe O, elle va passer sur la 1re poulie inférieure, puis sur la 1re supérieure, la 2e inférieure et la 2e supérieure, etc. ; finalement le bout libre part de la 3e poulie supérieure. Supposons que sur ce bout libre on exerce une traction F, cette traction est transmise à chaque brin ; comme il y en a six, autant que de poulies, la résultante de toutes ces forces dirigée de bas en haut est 6 F. Par conséquent, on peut, à l'aide de ce procédé, multiplier la force par le nombre de poulies employé. Cette combinaison est connue sous le nom de moufles.

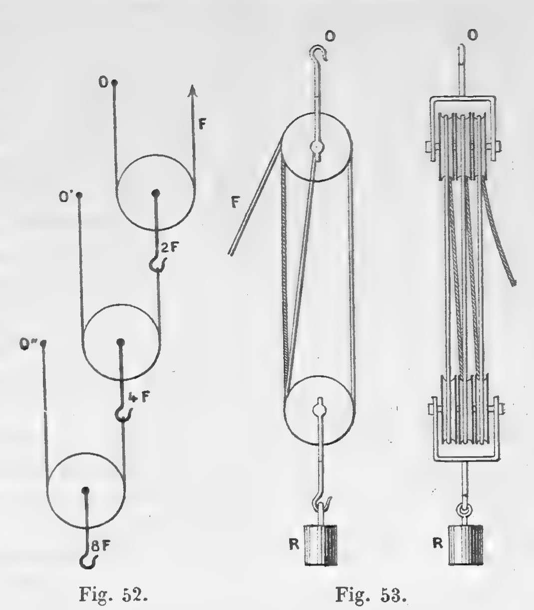


Fig. 52. Fig. 53.

Nous avons supposé jusqu'ici que le brin moteur et le brin résistant étaient parallèles pour la poulie fixe; il n'y a rien de changé quand cela n'est plus, la transmission de force se fait toujours intégralement. Pour la poulie mobile, il en est de même au point de vue du brin moteur et du brin fixe, mais la résultante de ces deux forces, et par suite le poids qu'il est possible de soulever, n'est plus égale à leur somme; il suffit de jeter les yeux sur la figure ci-contre pour voir qu'on n'a plus affaire à une composition de forces parallèles, mais de forces concourantes en un point. Il suffit, pour trouver la résultante, de transporter les deux forces F en un même point, par exemple sur l'axe de la poulie, et de construire le parallélogramme des forces suivant la méthode connue : on voit alors que la résultante n'est jamais égale au double de F, et qu'elle s'en écarte d'autant plus que les deux brins sont plus obliques.

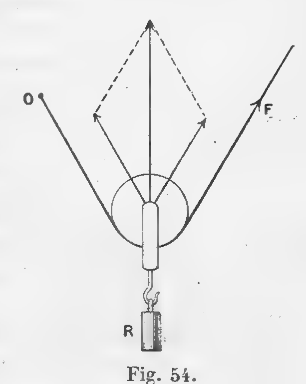


Fig. 54.

Ce dispositif s'emploie souvent en sens inverse lorsqu'il s'agit, à l'aide d'une corde tendue, d'exercer un effort très considérable. Soit une corde tendue entre deux points A et B; sans même employer la poulie, exerçons sur la corde au voisinage de son milieu M un effort F perpendiculaire à la corde,

cette corde va se tendre davantage, et pour voir quelle est la traction qu'elle subira ainsi il suffit de décomposer F en deux forces dirigées suivant les deux brins, c'est-à-dire mener par l'extrémité de F deux parallèles aux deux brins. On a ainsi les deux composantes aM, bM, et il suffit de regarder la figure pour voir qu'elles sont d'autant plus grandes que la corde s'est moins déplacée, c'est-à-dire qu'elle était déjà plus tendue. Voici comment ce principe s'applique dans la pratique. On fait passer la corde que l'on veut tendre dans un anneau A et, exerçant une traction aussi considérable que possible, on l'attache en B. Il suffit ensuite d'exercer en M un effort transversal pour produire une traction très considérable sur AX.

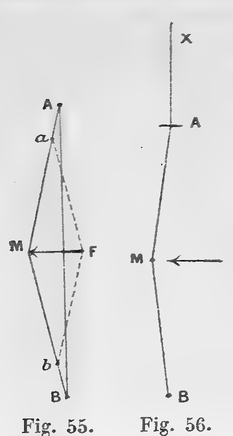


Fig. 55. Fig. 56.

Levier.

Le levier se compose essentiellement d'une pièce rigide que nous supposerons rectiligne, par exemple d'un bâton ou d'une barre de fer. Cette tige s'appuie par un de ses points sur un support fixe A nommé l'appui. En un autre point R se trouve la résistance à vaincre. Enfin, en P s'exerce la force agissante que l'on nomme la puissance.

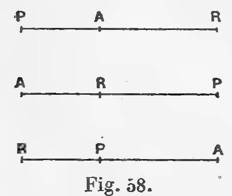


Fig. 57.

On voit immédiatement que dans le cas de la figure la force P déplacera le point R de bas en haut si le point A est fixe.

On a cherché à établir une classification dans les leviers suivant les positions respectives des trois points A, P, R, et l'on a distingué des leviers du premier, du second et du troisième genre.

P A R

A R P

R P A

Fig. 58.

Dans le levier du premier genre, le point d'appui se trouve entre la puissance et la résistance. Dans celui du deuxième genre, la résistance est au point intermédiaire, et dans le troisième genre ce point est occupé par la puissance.

En réalité, au point de vue mécanique, cette distinction n'a aucun intérêt. Ce qui importe dans chaque cas, c'est de savoir quelle résistance on peut vaincre à l'aide d'une puissance donnée P. Cela revient à chercher quelle résistance fait équilibre à la puissance, ou dans quelles conditions ces deux forces ont même moment par rapport au point fixe.

Appelons p la distance de la puissance au point fixe, n la distance de la résistance, exprimons que les deux moments sont égaux, nous aurons :

$$Pp = Rr,$$

ou bien

$$\frac{P}{R} = \frac{r}{p},$$

c'est-à-dire que les forces sont en raison inverse de leur distance au point fixe, ce que l'on exprime en disant que plus le bras de levier est long, moins la force correspondante est grande ; si on double un bras de levier, on peut réduire de moitié la force et obtenir le même effet. Mais naturellement, lorsqu'il s'agit de déplacer le point d'application de la résistance d'une certaine quantité, par exemple de soulever un poids d'une certaine hauteur, plus la force que l'on emploie est petite, plus le déplacement qu'il faut faire subir au point d'application de cette puissance est grand.

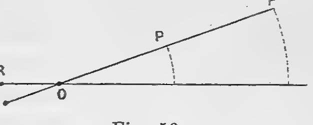


Fig. 59.

Ainsi, dans le cas ci-contre, nous avons représenté deux positions d'un levier.

Pour soulever le poids R, on pourra employer la force P ou la force moitié moindre P′, mais pour obtenir le même déplacement de R, P′ devra faire un chemin double de P. C'est encore le principe de transmission intégrale du travail qui s'applique ; pour produire un même travail en R, le produit de P par le chemin qu'il parcourt doit toujours être le même.

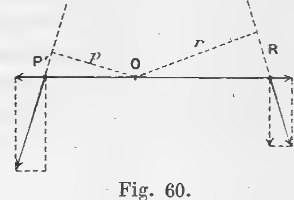


Fig. 60.

En général, comme nous l'avons supposé sur les figures, les leviers sont rectilignes et les forces perpendiculaires au levier ; mais ces deux conditions peuvent se trouver changées.

Il peut arriver d'abord que les forces aient des directions quelconques par rapport au levier. L'équilibre s'obtient encore en prenant les moments des deux forces par rapport au point d'appui fixe, c'est-à-dire en ne comptant pas les longueurs p et r sur le levier, mais en prenant pour ces valeurs les perpendiculaires abaissées de O sur les forces.

Ou bien on peut ramener ce cas au précédent en décomposant chaque force en deux autres, une dirigée suivant le levier qui ne produira aucune rotation puisqu'elle passera par l'axe, une autre perpendiculaire au levier que l'on prendra seule en considération.

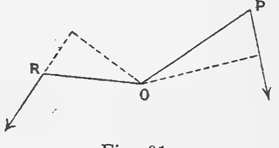


Fig. 61.

On fera de même quand le levier sera quelconque, on écrira que les moments Rr et Pp des deux forces par rapport au point O sont égaux, en prenant pour p et r les perpendiculaires abaissées du point fixe sur les forces R et P. Ou bien, ce qui pourrait être plus commode dans certains cas, on décomposera les forces R et P, chacune en deux autres, dirigées suivant le bras de levier correspondant et perpendiculairement à ce bras de levier.

Coin.

Le coin est un corps solide terminé par deux plans inclinés AB et AC, que l'on introduit de force entre deux corps résistants R et R′, pour les séparer l'un de l'autre.

Au point de contact du coin et des deux corps R et R′, ce coin subit de la part de ces corps des réactions f et f' normales aux surfaces AB et AC. La composante de f et f' doit faire équilibre à F. Nous aurons par suite la valeur de f et de f' en prenant une longueur OF parallèle et égale à F, puis traçant deux lignes OX et OY parallèles à f et f' de la figure précédente. Il suffit ensuite de mener par l'extrémité F de OF deux lignes complétant le quadrilatère Of et Ff', comme cela résulte de la loi de composition et de décomposition des forces, pour avoir la valeur des réactions f et f' des corps R et R′ contre le coin.

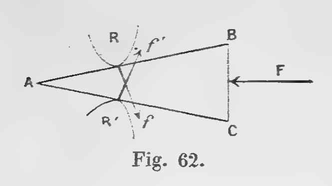


Fig. 62.

Il est bien évident que ces réactions sont aussi égales aux actions que le coin exerce sur les corps R et R′, pour les écarter l'un de l'autre.

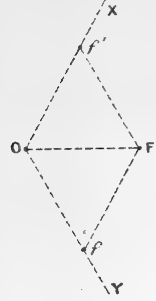


Fig. 63.

On voit immédiatement que, prenant une même force F, f et f' sont d'autant plus grands que l'angle fOf' est plus ouvert, c'est-à-dire que l'angle BAC du coin est plus petit.

Avec un angle BAC faible, on peut arriver à développer des efforts énormes, comme on le fait avec le levier, en plaçant le point d'appui très près de la résistance et loin de la puissance.

Mais ici encore on perd en chemin parcouru ce que l'on gagne en force. Il suffit en effet de regarder la figure pour voir qu'avec un coin à faible angle il faudra, pour obtenir un même écartement de R et R′, faire avancer le coin d'autant plus que cet angle A est plus petit.

PROPRIÉTÉS DES SOLIDES

Par M. GARIEL

PROFESSEUR A LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE PARIS.

DIFFÉRENTS ÉTATS DES CORPS

Les corps qui se présentent à notre observation se distinguent les uns des autres par leurs propriétés, c'est-à-dire par la manière dont ils mettent en action nos organes des sens (propriétés organoleptiques), dont ils réagissent sous l'influence d'autres corps (propriétés mécaniques, chimiques ou physiques).

Au point de vue des actions mécaniques particulièrement, ils se comportent de manière très différente suivant ce qu'on appelle leur *état*, qui est défini par un certain nombre de caractères.

Il a été jugé commode, à ce point de vue, de considérer trois états distincts, c'est-à-dire trois types qui, placés dans les mêmes conditions, donnent naissance à des effets mécaniques très différents : l'état solide, l'état liquide et l'état gazeux.

On peut les définir ainsi qu'il suit :

Un corps est à l'*état solide* lorsque, pour faire varier sa forme ou ses dimensions (à une même température), il faut faire agir des forces d'une grande intensité.

Un corps est à l'*état liquide* lorsque, toujours à la même température, on fait aisément varier sa forme, mais qu'il faut faire intervenir des forces très intenses pour faire varier son volume.

Un corps est à l'*état gazeux* lorsque, à une température déterminée, on fait aisément varier sa forme et son volume.

On réunit quelquefois les corps dans les deux derniers états en disant qu'ils sont à l'*état fluide*, caractérisé par la facilité de changement de forme : les corps à l'état liquide sont dits des fluides incompressibles, les corps à l'état gazeux sont dits des fluides compressibles.

On établit quelquefois une distinction d'une autre nature, basée sur ce que le volume d'un corps à l'état liquide ne varie que peu lors même que la pression à laquelle il est soumis diminue jusqu'à zéro, tandis que, dans les mêmes conditions, le volume d'un corps à l'état gazeux augmente indéfini-

ment ; c'est ce que l'on exprime en disant que les corps à l'état gazeux sont des *fluides expansibles*.

En réalité, la question n'est pas aussi simple : il existe bien des corps qui, dans des conditions déterminées, présentent effectivement les caractères qui définissent l'état solide ou l'état liquide ou l'état gazeux. Mais il est des corps que l'on ne peut ranger absolument dans aucune de ces catégories, qui participent dans une certaine mesure des propriétés de deux d'entre elles. C'est ainsi que les corps dits *pâteux* sont intermédiaires en quelque sorte entre les corps à l'état solide et les corps à l'état liquide : par exemple, placés dans un vase, ils ne prennent pas immédiatement la forme de celui-ci comme le ferait un corps à l'état liquide ; mais ils prennent cette forme après un temps plus ou moins long, alors qu'un corps solide ne s'y adapterait jamais spontanément.

Il y a d'ailleurs des degrés dans cet état intermédiaire, degrés qui sont caractérisés par exemple par le temps plus ou moins long qui est nécessaire pour que le corps prenne la forme du vase où il est placé.

Aussi convient-il de concevoir que l'état solide et l'état liquide sont les deux extrémités d'une série continue dans laquelle se rangeraient une infinité d'états intermédiaires dans lesquels la facilité de déformation croîtrait d'une manière également continue.

On doit concevoir également qu'il y a une série ininterrompue d'états intermédiaires entre l'état liquide et l'état gazeux, quoique ces états intermédiaires ne se manifestent pas à nous d'une manière aussi nette que le font les états pâteux.

Il importe de remarquer qu'il n'est pas prouvé qu'il n'existe pas d'autres états que ceux que nous venons de signaler. Un corps qui, dans des conditions convenablement choisies et sous l'influence de certaines actions, serait le siège d'effets tout à fait différents de ceux que ces actions produisent dans les corps à l'état solide, à l'état liquide ou à l'état gazeux, doit être considéré comme se trouvant dans un autre état.

Il ne semble pas que de telles différences aient été observées jusqu'à présent sous l'influence d'actions mécaniques ; mais il s'en est manifesté sous l'influence d'actions électriques : un gaz dont la pression a été diminuée jusqu'à atteindre une valeur de l'ordre du millionième d'atmosphère donne naissance, sous l'influence de décharges produites par une bobine d'induction, à des effets absolument autres que ceux qui se manifestent dans un gaz à la pression atmosphérique et même d'un gaz à une pression de 1 millième d'atmosphère. Il est donc logique de considérer les gaz à un extrême degré de raréfaction comme étant réellement à un état différent de l'état gazeux : c'est là ce que M. Crookes a désigné sous le nom de corps à l'*état radiant*, ce qui constitue un quatrième état parfaitement défini.

Rien ne dit qu'on ne puisse en admettre encore d'autres.

Quoique l'expression soit généralement admise, on ne doit pas dire d'un corps qu'il est solide, par exemple, mais seulement qu'il est à l'état solide, car c'est là une manière d'être qui dépend des conditions extérieures, notamment de la température et de la pression, et qui peut changer lorsque celles-ci

se modifient. Tous les corps qui sont connus à l'état gazeux, par exemple, peuvent être amenés à l'état liquide et la plupart d'entre eux ont été observés également à l'état solide.

En général, et à moins d'indications contraires, lorsqu'on dit simplement d'un corps qu'il est solide, liquide ou gazeux, on sous-entend que ce corps est à l'état solide, à l'état liquide ou à l'état gazeux dans les conditions *ordinaires* de température et de pression.

Dans le présent chapitre, nous nous occuperons exclusivement des corps à l'état solide et plus spécialement de ceux qui sont à cet état dans les conditions ordinaires de température et de pression.

En se plaçant à un point de vue général, on peut classer les corps solides en deux catégories :

Dans l'une se rencontrent les corps amorphes et les corps cristallisés dans le système cubique, pour lesquels on doit penser, par raison de symétrie, que les molécules sont uniformément réparties dans toutes les directions et que, par suite, dans toutes les directions les diverses propriétés doivent être identiques : ces corps sont dits *isotropes*.

Au contraire, dans les corps cristallisés dans un système autre que le système cubique, la forme même des cristaux montre que les conditions ne sont pas les mêmes dans les diverses directions ; on est donc naturellement conduit à penser que les différentes propriétés ne se manifesteront pas absolument de la même façon dans ces diverses directions. Ces corps sont appelés corps *anisotropes*.

Les prévisions que nous venons d'indiquer ont été justifiées par l'expérience, notamment pour les phénomènes calorifiques, lumineux et électriques, dont nous n'avons pas à nous occuper ici. Nous verrons plus loin qu'il en est de même pour les actions mécaniques.

COHÉSION

Le fait que les corps solides sont difficilement déformables, qu'il faut un effort notable pour les diviser en fragments, peut s'expliquer en admettant qu'il existe des liaisons entre les molécules qui les composent. Cette propriété, que l'on désigne sous le nom de *cohésion*, pourrait résulter de forces attractives qui existeraient entre les molécules voisines ; ces forces attractives expliqueraient la difficulté de déformation et, d'autre part, on voit que pour rompre le corps il faudrait développer une force supérieure à la résultante de toutes les forces attractives existant entre les molécules situées sur les faces de séparation. La cohésion varie d'un corps à l'autre, et peut être évaluée par la *ténacité* dont nous parlerons plus loin et qui en est une conséquence.

Ces forces attractives moléculaires n'agiraient d'ailleurs qu'à de très petites distances ; car, en rapprochant deux fragments aussi complètement que possible, ils ne se réunissent pas, c'est-à-dire que les forces moléculaires ne se manifestent pas.

Cependant, dans quelques cas, où l'on peut exagérer le rapprochement

pour ainsi dire, on peut réunir complètement deux parties séparées. C'est ce qui se passe, par exemple, pour le caoutchouc : deux parties fraîchement et nettement coupées se soudent entre elles si on les presse l'une contre l'autre.

Mais la réunion n'est pas parfaite; on peut la rendre complète en mettant la soudure à plat sur une surface dure et frappant avec un marteau. Sous l'action du choc, comme nous le dirons, le caoutchouc s'aplatit, mais cet effet ne peut se produire qu'en s'accompagnant d'un allongement dans un sens perpendiculaire, allongement qui a pour effet de rapprocher les surfaces plus qu'elles n'étaient auparavant; on a diminué la distance des molécules voisines et les forces attractives se sont manifestées. La soudure une fois effectuée présente une solidité aussi grande que les autres parties.

On comprend que la soudure ne puisse se produire si les parties coupées sont salies, couvertes de poussière, parce que les matières étrangères empêchent les molécules de caoutchouc de se rapprocher suffisamment.

En comprimant très fortement un corps réduit en poudre, on réduit les distances qui séparent les fragments; il est possible de les réduire assez, au moins dans certains cas, pour que les fragments se réunissent en une masse compacte, ce qui est d'accord avec l'hypothèse ci-dessus indiquée; mais il faut développer des pressions considérables. M. Spring est parvenu à réunir en masse compacte du bismuth, réduit en poudre, sous l'influence d'une pression de 6 000 atmosphères; pour le graphite, il a suffi de 5 500 atmosphères, mais le charbon de sucre a résisté à une pression de 10 000 atmosphères. Une élévation de température paraît favoriser l'action : à 130° pour le zinc, l'action s'est manifestée sous une pression de 5 000 atmosphères; à cette température, le métal est absolument solide et on ne peut invoquer un changement d'état.

La réunion se fait bien plus aisément pour les corps facilement déformables, les corps mous, et de faibles pressions suffisent : la facilité de déformation permet de comprendre que les parties en présence se moulent pour ainsi dire les unes sur les autres de manière que tous leurs points se rapprochent considérablement.

Le passage par l'état liquide facilite la réunion des parties; en soumettant à la fusion des fragments d'un corps, on obtient une masse continue par le refroidissement qui ramène le corps à l'état solide.

L'effet est le même dans le cas de la dissolution; par exemple, les cristaux obtenus par cette voie constituent des masses solides résistantes.

ADHÉSION

Des effets analogues à ceux que nous venons de signaler se manifestent même entre des corps de nature différente; c'est là ce qui constitue l'*adhésion*.

En pressant l'une contre l'autre deux lames présentant en regard des surfaces planes parfaitement polies, elles deviennent adhérentes et il faut un certain effort pour les séparer. On s'est assuré, en opérant dans le vide, que cette action ne peut pas être attribuée à la pression atmosphérique qui agirait comme elle le fait dans l'expérience des hémisphères de Magdebourg.

Les exemples d'adhérence sont très nombreux; c'est à cette propriété qu'il faut rapporter le fait que les particules détachées d'un crayon par le frottement sur une feuille de papier y restent attachées, alors même que, par la position du papier, l'action de la pesanteur tendrait à les en détacher. De même pour les traits produits sur un tableau noir par de la craie; de même aussi pour les poussières qui restent fixées sur la peau, sur les tissus, etc.

Quelquefois, sous l'influence de pressions énergiques qui ont pour effet de rapprocher les molécules, la réunion devient complète et on ne peut obtenir la séparation ultérieure que par l'emploi de forces considérables. C'est ainsi que, en laminant une lame d'or superposée à une lame d'argent, on obtient une réunion complète de ces métaux.

Le passage par l'état liquide facilite la manifestation de l'adhésion; c'est sur cette remarque qu'est basée, par exemple, la soudure des métaux : entre les deux pièces à réunir, on place, à l'état solide, un alliage facilement fusible et on chauffe à une température suffisante pour produire cette fusion sans provoquer celle des pièces à souder. Par suite du refroidissement, l'alliage se solidifie et, adhérant à chacun des métaux, les réunit d'une manière invariable.

La dissolution agit d'une manière analogue : la gomme, par exemple, qui, même réduite en poudre très fine, n'adhère pas au papier, s'y fixe très solidement au contraire lorsqu'elle est déposée à l'état de solution et qu'elle repasse à l'état solide par suite de l'évaporation du liquide.

DURETÉ

Lorsque deux corps glissent l'un sur l'autre, surtout sous l'influence d'une pression notable, il arrive presque toujours que la surface de l'un d'eux est entamée, qu'il s'en détache des parcelles plus ou moins fines : il y a *usure* de ce corps. Il peut arriver qu'il y ait à la fois usure des deux corps.

Lorsque l'un des corps se termine par une arête aiguë ou une pointe fine, l'usure peut se manifester, même après un seul passage, par l'apparition d'un sillon plus ou moins profond à la surface de l'autre corps ; on dit alors que ce corps a été *rayé*.

La disposition du premier corps en pointe est une condition qui permet de voir facilement l'effet produit, ce n'est pas la condition essentielle ; celle-ci réside dans la nature même des corps. Si, en effet, on répète l'expérience en renversant les rôles, c'est-à-dire en taillant en pointe le second corps que l'on promènera à la surface du premier, on reconnaît que celui-ci n'est pas rayé, même si l'on a exercé une forte pression. Il y a donc là une manière d'être, une propriété spéciale des corps que l'on indique en disant que le corps qui a été rayé est moins *dur* que l'autre.

Le sens du mot *dur* et du mot *dureté* tels qu'on les emploie dans le langage ordinaire est mal défini et, suivant le cas, se rapporte souvent à des propriétés différentes. Dans le langage scientifique, au contraire, ce sens, absolument limité, est bien déterminé : un corps A est plus dur qu'un corps B lorsque A raye B.

On a dressé pour les métaux une liste relative à la dureté dans laquelle ces

corps sont rangés dans un ordre tel que chacun raye les suivants et est rayé par ceux qui le précèdent. On précise un peu mieux cette propriété en indiquant comment les métaux se comportent par rapport à certains corps pris comme types.

C'est ainsi qu'a été dressé le tableau suivant :

Chrome	Raye le verre.
Fer, Nickel, Cobalt, Antimoine, Zinc	Sont rayés par le verre, rayent le spath d'Islande.
Palladium, Platine, Cuivre, Or, Argent, Bismuth, Cadmium, Étain	Sont rayés par le spath d'Islande.
Plomb, Potassium, Sodium	Sont rayés par l'ongle.

Il est regrettable que cette liste ne contienne pas les alliages usuels.

Lorsque le corps n'est pas homogène, l'action peut varier non seulement avec la nature des éléments qui le composent, mais aussi par leur disposition relative. Aussi la dureté n'est pas alors un caractère bien défini : on a cependant (Burdach) dressé une liste d'après l'ordre de dureté pour certaines substances organisées. Voici cette liste.

Émail, — Ongles, — Os, — Cartilages, — Tendons, — Muscles, — Glandes, — Muqueuses, — Séreuses, — Substance cérébrale, — Neurine, — Tissu cellulaire, — Tissu adipeux.

Dans le cas de corps cristallisés dans un système autre que le système cubique, la dureté peut n'être pas la même sur les diverses faces, ou, dans une même face, suivant des directions différentes, comme Huygens l'a reconnu le premier pour le spath d'Islande. Ces faits répondent bien à l'idée qu'on se fait de la constitution moléculaire des cristaux, de leur anisotropie.

RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX

Par M. GARIEL

DÉFORMATION DES SOLIDES SOUMIS A DES FORCES

En mécanique rationnelle, on considère seulement des solides *invariables*, c'est-à-dire des corps qui ne peuvent changer absolument ni de forme ni de dimensions, quelle que soit la grandeur des forces qui agissent sur eux, ce qui revient à dire que les distances entre les points matériels qui les constituent ne peuvent jamais être modifiées par des actions mécaniques.

De semblables corps, s'il en existait, devraient être considérés comme représentant le type d'un solide parfait ; il y a seulement des corps qui s'en rapprochent plus ou moins.

En réalité, lorsqu'un corps solide est soumis à l'action d'une force ou d'un système de forces, indépendamment du mouvement qui peut se manifester, on observe des déformations dont la nature et la grandeur dépendent des conditions de l'expérience, et, en même temps, il se produit, d'une manière presque absolument générale, une variation de volume, très faible d'ailleurs.

L'étude de ces déformations et de ces variations de volume constitue ce que l'on appelle l'étude de la résistance des matériaux.

Lorsqu'un corps est soumis à l'action de forces, on doit concevoir que, quelle que soit la valeur de celles-ci, il doit se produire des déformations ; mais, en réalité, celles-ci ne sont appréciables que lorsqu'elles ont une certaine grandeur et ont exigé des forces d'une certaine intensité. Au-dessous de cette intensité, les forces semblent ne pas agir, parce que les déformations sont trop faibles pour être appréciées, de telle sorte que le corps soumis à l'expérience paraît posséder, dans les conditions de l'expérience, les qualités d'un solide parfait. Mais il n'en est rien, et ce résultat est dû seulement à ce que nous ne possédons pas de moyens d'appréciation suffisants pour évaluer les déformations dans ces conditions.

ÉLASTICITÉ. — DÉFORMATIONS ÉLASTIQUES

Si les forces employées atteignent une valeur suffisante, la déformation peut aller jusqu'à la rupture, c'est-à-dire à la séparation du corps en fragments distincts les uns des autres.

Lorsque ce cas ne se présente pas, c'est-à-dire lorsqu'il y a seulement déformation à proprement parler, si les forces cessent d'agir, on observe en général que les déformations ont diminué ou même ont complètement disparu, c'est-à-dire que le corps s'est rapproché de son état primitif (forme et volume) ou même l'a tout à fait atteint.

Sans rien préjuger de la cause de cette action, nous appellerons *élasticité* d'un corps la propriété qu'il possède de tendre à reprendre son état primitif lorsque cesse l'action des forces qui l'avaient déformé.

Si, après avoir subi des déformations, le corps abandonné à lui-même reprend absolument son état primitif, on dit qu'on n'avait pas dépassé, dans l'expérience, la *limite d'élasticité* et les déformations observées sont dites *déformations élastiques*.

Si, au contraire, le corps ne revient pas absolument à son état primitif, s'il subsiste des déformations permanentes, on dit que la limite d'élasticité a été dépassée.

On conçoit qu'on puisse ranger les corps au point de vue de l'élasticité d'après la limite d'élasticité, c'est-à-dire d'après la valeur de la plus grande force qui, toutes choses égales d'ailleurs, produit des déformations élastiques. Un corps est d'autant plus élastique que cette valeur est plus considérable.

On dit absolument qu'un corps est *élastique* lorsque la limite d'élasticité est éloignée, c'est-à-dire lorsque, sans dépasser cette limite, on peut faire subir au corps des déformations notables.

Un corps mou est, au contraire, un corps pour lequel la limite d'élasticité est rapprochée, c'est-à-dire un corps qui conserve des déformations permanentes, même sous l'influence de forces de faible intensité. On voit que le mot *mou* n'a pas alors absolument la même signification que dans le langage ordinaire, où il se rapporte surtout aux corps présentant une consistance spéciale appréciable au toucher.

Il n'existe pas de corps absolument élastiques, c'est-à-dire de corps qui reprendraient toujours leur état primitif, quelle que fût la grandeur des forces auxquelles ils avaient été soumis, après que ces forces auraient cessé d'agir. L'expérience montre qu'on arrive toujours, en faisant croître l'intensité des forces, à une valeur qui produit soit la déformation permanente, soit la rupture du corps.

Il n'existe pas non plus de corps qui soient absolument mous, c'est-à-dire qui subissent des déformations permanentes, quelque petite que soit la force qui agisse, ou, du moins, il n'en existe pas parmi les corps qui sont franchement solides et non pâteux.

Au premier abord, cependant, il semble qu'il existe de semblables corps et, par exemple, on cite volontiers le plomb parmi ceux qui seraient dans ce cas. Il n'en est rien cependant, et on peut mettre l'élasticité du plomb en évidence en laissant tomber, d'une certaine hauteur, des grains de ce métal sur un plan dur : on observe qu'ils rebondissent, ce qui exige, d'après la théorie du choc des corps, qu'ils présentent une certaine élasticité.

Dans des conditions déterminées d'application d'une force, on arrive tou-

jours, en faisant croître l'intensité de celle-ci, à briser le corps, à le diviser en fragments. La force qui produit cette division est appelée *charge de rupture* pour le mode d'application considéré.

On dit qu'un corps est cassant lorsque la charge de rupture a une valeur peu éloignée de celle de la force qui correspond à la limite d'élasticité, et il est d'autant plus cassant que ces valeurs diffèrent moins l'une de l'autre.

Un corps solide soumis à des forces quelconques subit des déformations dont il est difficile, en général, de déterminer à l'avance la forme et la grandeur; dans certains cas, au contraire, ces déformations obéissent à des lois simples. C'est seulement ces cas que nous examinerons : la démonstration des lois auxquelles on est conduit est trop facile à concevoir pour qu'il soit nécessaire d'insister sur le principe même, puisqu'il suffit de mesurer les forces appliquées au corps, d'une part, et les déformations produites d'autre part. On fait varier l'intensité des forces, ce qui amène une variation dans la grandeur de la déformation, et l'on cherche quelle relation existe entre ces deux quantités.

Quant aux détails de l'expérience et à la disposition des appareils qu'il faut employer pour effectuer ces mesures, leur description nous entraînerait trop loin sans présenter un réel intérêt.

TRACTION. — COMPRESSION

Considérons un corps prismatique ou cylindrique, de section quelconque d'ailleurs, dont une des extrémités est maintenue absolument fixe, et supposons qu'à l'autre base on applique une force dont la direction soit parallèle à celle des arêtes du prisme (une des génératrices du cylindre, si la section est limitée par une ligne courbe). Deux cas peuvent se présenter :

1° La force tend à éloigner son point d'application de la base fixe, à allonger le prisme par conséquent ; on dit alors que celui-ci subit une traction ;

2° La force tend à rapprocher son point d'application de la base fixe, à raccourcir le prisme, par conséquent; on dit alors que celui-ci subit une compression.

En général, les forces qui doivent être appliquées pour produire des effets appréciables doivent être grandes par rapport au poids du prisme et ce poids peut être considéré comme négligeable.

Si l'on voulait en tenir compte, la question serait compliquée en général, si la force appliquée avait une direction quelconque par rapport à la verticale, car le prisme subirait alors une déformation autre qu'une simple variation de longueur.

La question ne présenterait pas de difficulté, au contraire, si la force appliquée au corps était verticale; seulement, dans ce cas, la force réellement agissante, celle dont il faudrait tenir compte, aurait une intensité qui serait égale : à la somme de la force appliquée au prisme et du poids de celui-ci, si la force agissait de haut en bas ; — à la différence de ces deux valeurs si la force appliquée agissait de bas en haut.

Ce cas, qui est le seul que nous considérerons, est celui où la force qui agit

pour produire la déformation est due à l'action d'une masse pesante que l'on suspend à la partie inférieure d'un prisme fixé par sa base supérieure, ou que l'on pose sur la base supérieure d'un prisme reposant inférieurement sur un plan invariable.

En mesurant les allongements élastiques qui se produisent dans les différents cas, et faisant varier successivement le poids tenseur, la longueur primitive du prisme, sa section et la nature de sa substance, on est arrivé à trouver les lois suivantes :

L'allongement élastique d'un corps prismatique dont une extrémité est maintenue fixe :

1° Est proportionnel à la force qui produit la tension ;

2° Est proportionnel à la longueur primitive du prisme ;

3° Est inversement proportionnel à la section du prisme.

On reconnaît aussi que cet allongement varie avec la nature du prisme, toutes choses égales d'ailleurs.

Si donc on appelle l l'allongement observé, L la longueur primitive du prisme, S sa section, F la force qui lui est appliquée et E un coefficient qui dépend de la nature du corps, on a la formule :

$$l = \frac{LF}{ES}.$$

Si on appelle L′ la longueur du prisme pendant qu'il est soumis à la traction, on a :

$$L' = L + l = L\left(1 + \frac{F}{ES}\right).$$

Le quotient $\frac{F}{S}$ a une signification : il représente la force appliquée par unité de surface de la section, si l'on admet que cette forme est uniformément répartie en tous les points de cette section. Si nous désignons cette quantité par φ, on peut écrire ainsi qu'il suit les formules précédentes :

$$l = \frac{L\varphi}{E} \quad \text{et} \quad L' = L\left(1 + \frac{\varphi}{E}\right).$$

On voit que lorsque la force qui produit la traction est uniformément répartie, l'allongement est indépendant de la grandeur de la section si la tension par unité de surface reste constante.

Le nombre E est ce que l'on appelle le coefficent d'élasticité de la substance considérée.

En général, on évalue les longueurs L et l en mètres, les sections en millimètres carrés et les poids en kilogrammes. Nous donnons ci-après les valeurs de E pour les principaux métaux usuels.

Lorsque la température varie, l'élasticité des corps change, c'est-à-dire que, toutes choses égales d'ailleurs, l'allongement varie avec la température, ce

qui revient à dire que le coefficient d'élasticité d'un corps varie avec la température. On n'a d'ailleurs pas trouvé de relation constante entre ces données.

	15°.	100°.	200°.
Plomb	1 727	1 630	»
Or	5 584	5 408	5 482
Argent	7 140	7 274	6 374
Cuivre	10 519	9 827	7 862
Platine	15 518	14 178	12 964
Fer	20 794	21 877	17 700
Acier fondu	19 561	19 014	17 926

L'allongement élastique d'une barre peut se produire non seulement par l'action continue d'une force, mais aussi par une action brusque produite par un corps; dans ce cas, il faut tenir compte à la fois de la masse de ce corps et de la vitesse dont il est animé. L'effet produit est plus considérable que celui qui serait le résultat d'une traction continue exercée par le même corps agissant par son poids.

Lorsqu'on examine une barre prismatique soumise à une traction, on reconnaît que l'allongement n'est pas la seule modification qui se produise : il y a en même temps une diminution de section, une contraction. Le fait se reconnaît facilement en opérant sur une barre de caoutchouc que l'on étire.

Dans ces conditions, que devient le volume du corps? On ne peut le prévoir, puisque les deux variations produites sont inverses, et l'expérience seule peut lever cette indétermination.

Il résulte des observations faites par divers physiciens, notamment par Cauchy et par Wertheim, que le volume augmente pendant la traction ; mais les résultats obtenus ne sont pas concordants quant à la valeur numérique de cet accroissement, qui est très faible d'ailleurs.

Les lois que nous venons de donner pour la traction ont été déterminées, comme nous l'avons indiqué, par des expériences faites sur des corps non organisés, sur des métaux en général; il y avait donc lieu de rechercher si ces lois sont applicables aux corps organisés.

Wertheim a fait à ce sujet une série d'expériences dont voici les conséquences principales (sauf en ce qui concerne les muscles qui sont étudiés dans un chapitre spécial).

1° Les tissus osseux obéissent sensiblement aux lois que nous avons indiquées pour les corps non organisés. Il n'en est pas de même pour les parties molles du corps dans leur état naturel d'humidité : les allongements varient plus rapidement que les charges et les accroissements sont d'autant plus rapides que les charges sont plus grandes.

2° Lorsque les allongements élastiques deviennent très grands, ils s'accroissent au contraire beaucoup moins rapidement que les charges. Mais cette différence, qui ne se manifeste que pour les corps mous comme les vaisseaux, peut provenir de ce qu'il se produit d'abord un allongement dit *primaire*, qui se continue ultérieurement pour ne cesser qu'après plusieurs minutes, donnant ainsi un allongement secondaire : Wertheim ne tenait compte que des allongements primaires.

3° Par la dessiccation, toutes les parties augmentent d'élasticité et tendent à s'allonger suivant la loi de proportionnalité aux charges.

Les coefficients d'élasticité déduits des expériences de Wertheim sont compris entre les valeurs suivantes :

Os..............	1819	à	2638	Muscles..........	0,26	à	1,27
Tendons..........	128	à	200	Veines............	0,84	à	0,88
Nerfs............	10	à	32	Artères............	0,05		

Il convient de reconnaître que la connaissance de ces coefficients n'a que peu d'importance au point de vue pratique.

Imbert a étudié le caoutchouc et a trouvé que, comme l'avait signalé Wertheim pour les tissus organiques, les allongements croissent d'abord plus vite que les charges, puis proportionnellement aux charges, puis moins rapidement.

Il a trouvé que pour la phase de proportionnalité les *longueurs* sont elles-mêmes proportionnelles aux charges.

Les lois qui règlent les déformations élastiques produites lors de la compression sont exactement les mêmes que celles que nous avons données pour la traction ; il est donc inutile de les répéter, Les formules sont aussi les mêmes; si donc nous désignons par l le raccourcissement, on aura, les autres lettres conservant la même signification que précédemment :

$$l = \frac{LF}{ES}, \qquad \text{ou} \qquad l = \frac{L\varphi}{E}$$

et

$$L' = L - l = L\left(1 - \frac{ES}{F}\right), \qquad \text{ou} \qquad L' = L\left(1 - \frac{\varphi}{E}\right).$$

Il est à noter spécialement que la valeur du coefficient d'élasticité E est la même pour la traction et pour la compression.

Lors de la compression, le prisme en expérience augmente de section; comme pour la traction, il n'y a pas compensation entre cette augmentation et la diminution de longueur, et l'expérience a démontré que le volume diminue.

On conçoit aisément que, tandis que pour la traction le corps peut ne pas être rigide, il n'en est pas de même pour la compression. La traction se manifeste aisément pour un corps flexible, pour un fil, par exemple, et les lois que nous avons indiquées sont applicables à ce cas.

Non seulement, pour que la compression puisse se produire, il faut que le corps soit rigide, mais même, dans ce cas, pour observer les déformations simples que nous avons supposées, il faut que la hauteur du prisme ne soit pas grande par rapport aux dimensions transversales; il ne faut pas, par exemple, qu'elle ait une valeur quinze à vingt fois plus grande. Si le corps soumis à l'expérience est trop allongé, dès que la force cesse d'être rigoureusement parallèle à l'axe du prisme, le corps se déforme latéralement, et une flexion plus ou moins accentuée vient se joindre au raccourcissement; dès lors, les lois précédemment indiquées ne sont plus applicables.

Il en est encore de même, quoique la force qui comprime le corps soit rigoureusement parallèle à l'axe, si le corps n'est pas parfaitement homogène, et, comme il est facile de le comprendre, cette condition est très rarement réalisée.

Il est aisé de concevoir que la formule qui permet de calculer la déformation par traction ou par compression, quand on connaît les dimensions du prisme et l'intensité de la force qui lui est appliquée, permet, au contraire, de calculer la valeur de celle-ci lorsqu'on a mesuré l'allongement ou le raccourcissement.

De la formule que nous avons donnée, on déduit en effet :

$$F = \frac{ESl}{L}.$$

Il n'est même pas nécessaire de déterminer l'allongement total. Remarquons, en effet, que $\frac{l}{L}$ représente l'allongement par unité de longueur de la barre; si nous désignons cette quantité par λ, il vient donc :

$$F = ES\lambda.$$

On peut concevoir que des actions analogues à la traction et à la compression puissent se produire dans des cas moins simples que ceux que nous venons d'examiner, par exemple dans le cas d'un corps de forme quelconque soumis à l'action de différentes forces appliquées en des points quelconques et avec des directions variables.

Sans nous arrêter au cas général, nous pouvons en examiner un qui se présente dans des conditions simples : c'est celui d'un corps qui est plongé dans un liquide pesant. On sait que ce corps est soumis, en chacun de ses points, à une force normale à sa surface et dont la valeur est connue : si le corps n'a pas une grande hauteur verticale, on peut négliger les variations de pression dues à l'action de la pesanteur, et les pressions ont la même valeur en tous les points.

On conçoit que, dans ce cas, il y a diminution de volume; on a démontré que sa valeur est donnée par la formule suivante :

$$v = \frac{Vp}{E}$$

dans laquelle v est la diminution cherchée, V le volume initial, p la pression par unité de surface, et E un coefficient qui a la même valeur que le coefficient d'élasticité de traction et de compression.

Si nous appelons V′ le volume final, on a :

$$V' = V + v = V\left(1 + \frac{p}{E}\right).$$

Ces variations de volume sont petites et négligeables dans la plupart des cas.

Si, dans les mêmes conditions extérieures, le corps est creux, ses parois étant supposées rigides, la variation de volume est plus grande; mais le phénomène ne se rattache à la déformation que nous considérons que si le corps a la forme d'une sphère ou d'un cylindre circulaire terminé par deux hémisphères, parce que, dans ces cas seulement, il reste semblable à lui-même. Pour toute autre disposition, la variation de volume se complique d'une variation de forme; la déformation comprend une action analogue à la flexion dont nous parlons plus loin.

Il en est de même absolument dans le cas d'un corps creux rempli d'un liquide pesant et dont, par conséquent, tous les points sont soumis à une force normale agissant dans un sens tel que la capacité s'accroît.

Il peut arriver que le corps creux considéré, rempli d'un liquide soumis à une certaine pression, soit plongé dans une autre masse liquide soumise à une pression différente. Si le corps est sphérique, il ne changera pas de forme; il faudrait évaluer l'effet produit par chacune de ces actions; l'effet total sera la différence des deux valeurs obtenues, et sera de même nature que l'effet simple le plus considérable.

De même que précédemment, si le corps n'est pas sphérique, il change non seulement de volume, mais aussi de forme, et la déformation ne peut plus être assimilée à une traction ou à une compression simple.

Un cas particulier mérite d'être signalé, en supposant toujours le corps creux ayant la forme d'une sphère ou d'un cylindre terminé par deux hémisphères, condition pour qu'il reste semblable à lui-même : c'est celui dans lequel les liquides sont soumis à la même pression à l'intérieur et à l'extérieur. On pourrait penser que cette égalité de pression a pour effet de ne produire aucune variation de volume. Il n'en est rien, cependant, et, en effet, il faut remarquer que, les pressions par unité de surface étant les mêmes à l'intérieur et à l'extérieur, l'action extérieure doit être prépondérante, parce qu'elle s'exerce sur une surface d'une plus grande étendue. L'expérience montre, en effet, qu'il y a diminution de volume dans ce cas.

Un raisonnement assez simple permet même de prévoir ce qui doit se produire; sans nous y arrêter, nous dirons que la diminution de capacité du corps considéré est égale à la variation de volume que subirait une masse solide de même nature que la paroi, et qui occuperait cette capacité, si elle était soumise à l'action d'un liquide exerçant la même pression.

FLEXION

Dans la traction et la compression, la force qui produit la déformation est parallèle à l'axe du prisme en expérience; mais des déformations d'une autre nature se manifestent également quand la force a une autre direction; nous examinerons le cas le plus simple.

Considérons un prisme posé sur deux appuis fixes, et supposons qu'une force perpendiculaire à la direction de ses arêtes agisse en un point compris

entre ces appuis. Sous son influence, le prisme se déformera, se courbera, il *fléchira*, et la grandeur de la flexion sera mesurée par la distance entre la position primitive de l'axe du prisme et le point de l'axe déformé qui s'en écarte le plus : cette distance a reçu le nom de *flèche*. Il est à remarquer que, dans cette action, ce n'est pas seulement la partie comprise entre les appuis, celle sur laquelle agit la force, qui est déformée; les parties extérieures aux appuis sont également dérangées de leur position, et se déplacent en sens contraire de la partie moyenne.

On peut également considérer un prisme dont une extrémité est libre, mais dont l'autre est *encastrée*, c'est-à-dire est fixée invariablement de manière à ne pouvoir subir de déplacement. Tel est le cas d'une barre dont une extrémité est pincée dans un étau ou est scellée dans un mur. Si une force est appliquée à l'extrémité libre, perpendiculairement à la direction du prisme, cette extrémité libre s'écarte de sa position d'équilibre, en même temps que le solide s'incurve dans toute sa longueur. Le déplacement de l'extrémité libre qui mesure la grandeur de la déviation est la *flèche*.

Enfin, il peut arriver que la barre soit encastrée à ses deux extrémités. Soumise à l'action d'une force perpendiculaire à sa direction, elle s'incurve et prend une flèche.

Les corps flexibles, les fils et les cordes, peuvent également prendre une flèche; mais il faut que, au début, ils soient tendus et fixés à leurs extrémités.

Il est à remarquer que, tandis que dans la traction et la compression les divers points d'une section droite subissent tous la même action, il n'en est pas de même dans la flexion. L'étude détaillée de la question montre, en effet, qu'il existe dans le prisme une section plane, primitivement normale à la direction de la force, qui, après la déformation, conserve la même longueur : c'est la *fibre neutre*. Mais il n'en est pas de même des autres sections primitivement parallèles à celle-ci; elles augmentent de longueur du côté de la convexité et diminuent du côté de la concavité. Il en résulte qu'il y a resserrement des molécules, compression, du côté de la concavité, tandis que les molécules s'écartent, qu'il y a dilatation, du côté de la convexité.

Nous n'indiquerons pas les lois de la flexion pour les divers cas qui peuvent se présenter.

Occupons-nous seulement, pour les barres rigides, pour les verges, suivant l'expression consacrée, du cas où l'une des extrémités est encastrée, l'autre étant libre.

Soient L la longueur de la verge que nous supposerons rectangulaire, la force F étant appliquée à l'extrémité libre, perpendiculairement à l'une des faces; a le côté du rectangle de section parallèle à la force, b l'autre côté; E′ un coefficient numérique qui dépend de la nature du corps et qu'on appelle le coefficient d'élasticité de flexion. Soit enfin f la flèche, celle-ci est déterminée par la formule :

$$f = \frac{FL^3}{E'a^3b}.$$

Sans insister sur les conséquences de cette formule, on voit que la flèche

croît très rapidement quand la longueur augmente; au contraire, elle diminue très vite quand augmente l'épaisseur de la verge *a* comptée dans la direction de la force.

On peut remarquer, comme pour la traction, que de la connaissance de la flèche on peut déduire la valeur de la force qui a produit la flexion; de cette formule, on déduit en effet :

$$F = \frac{E'a^3bf}{L^3}.$$

On voit que, pour une même barre, les forces sont proportionnelles aux flèches qu'elles produisent. Il va sans dire que ce résultat n'est applicable, comme tout ce que nous avons dit, que pour des déformations élastiques, c'est-à-dire tant qu'on n'a pas dépassé la limite d'élasticité; en réalité même, les formules cessent d'être applicables rigoureusement lorsque la déformation n'est pas très petite.

Supposons qu'on reste dans ces limites : on peut tirer une conséquence importante de la formule précédente.

Lorsque le corps est parvenu à l'état d'équilibre, la force F qui est appliquée au corps est contre-balancée par une autre force égale et contraire qui a pris naissance dans le corps, entre les molécules, par suite de la déformation même du corps; c'est ce qu'on appelle la *force élastique*. Celle-ci, comme la force F, est proportionnelle à la flèche, c'est-à-dire au déplacement qu'a subi un point de l'extrémité de la verge depuis sa position initiale. Si l'on vient à supprimer F, la force élastique, subsistant seule, aura pour effet de ramener le corps vers sa position d'équilibre; mais lorsqu'il y parviendra, le corps sera animé d'une certaine vitesse, dépassera cette position et fléchira en sens contraire; la flexion aura pour effet de faire naître des forces élastiques qui s'opposeront au mouvement; la vitesse diminuera, puis s'annulera; à ce moment, les forces élastiques, continuant d'agir, produiront un mouvement en sens inverse et le même effet se reproduira; le corps passera donc alternativement de part et d'autre de sa position d'équilibre : *il vibrera*.

Il est à remarquer que, dans ce mouvement, la force élastique ne conserve pas la même valeur, puisque nous avons montré qu'elle est proportionnelle au déplacement.

On démontre en mécanique que lorsqu'un point est soumis à une force dont l'intensité est proportionnelle à sa distance à un point fixe, il prend un mouvement identique à celui d'un pendule simple effectuant des oscillations de petite amplitude. Aussi dit-on que la verge qui oscille, qui vibre comme nous venons de l'indiquer, exécute des *oscillations pendulaires*.

Les propriétés du mouvement pendulaire sont donc applicables aux vibrations d'une verge qu'on a abandonnée après l'avoir écartée de sa position d'équilibre; en particulier, ces oscillations sont *isochrones*, c'est-à-dire qu'elles ont la même durée quelle que soit l'amplitude de la vibration (pourvu qu'elle reste petite naturellement, puisque la formule n'est rigoureusement applicable qu'à ce cas).

Cette remarque est importante et trouve son application en acoustique.

Dans la traction et la compression, la valeur de la déformation dépend seulement de la grandeur de la section, non de sa forme ; on voit, d'après la formule précédente, qu'il n'en est pas de même pour la flexion, car les côtés a et b n'ont pas la même influence.

On démontre en mécanique, en effet, que la forme de la section, c'est-à-dire la répartition de la matière dans la section, joue un rôle important. Les parties voisines de la fibre neutre produisent peu d'effet : mais la flèche est d'autant plus faible, toutes choses égales d'ailleurs, qu'il y a une plus grande quantité de matière à une plus grande distance de la fibre neutre. C'est ce qui explique qu'à égalité de poids un tube creux fléchit moins qu'une tige pleine ; qu'une barre à section carrée fléchit plus qu'un fer à double T : le fer à double T (I), par exemple, prend pour une charge donnée une flèche cinq fois moindre que celle que prendrait une poutre de section carrée et de même section (II).

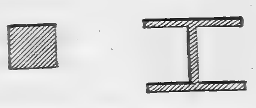


Fig. 64.

Il faut rapporter à la flexion simple des déformations qui se produisent pour des corps ne présentant pas la forme rectiligne.

Tel est le cas, par exemple, d'une ligne courbe dont on maintient une extrémité fixe et qui subit, à l'autre extrémité, l'action d'une force située dans son plan et perpendiculaire à sa direction ; la force a pour effet de rapprocher ou d'éloigner les extrémités, suivant le sens dans lequel elle agit et, en même temps, la courbure change dans toute l'étendue de la pièce.

Tel est encore le cas d'une lame mince roulée en spirale dont l'extrémité extérieure est fixe et dont l'extrémité centrale est invariablement reliée à un arbre perpendiculaire au plan de la spirale ; si l'on vient à faire tourner cet arbre d'un certain angle autour de son axe, il entraînera la lame qui se déformera dans toute son étendue en subissant une véritable flexion.

Considérons un corps annulaire présentant une forme circulaire ou non, elliptique par exemple, et dont la section soit quelconque. Si l'on fait agir deux forces de sens contraire en deux points opposés, le corps subira une déformation : il s'aplatira ou s'allongera dans la direction des forces et sa forme générale changera.

La déformation qui se produit dans ce cas est analogue à une flexion, mais, même dans les cas les plus simples, n'obéit pas à des lois simples que nous puissions signaler : il n'y a donc pas lieu de nous y arrêter ; toutefois, nous avons cru utile de signaler ce genre de déformation qui donne lieu à des applications variées.

TORSION

Les déformations que nous avons étudiées se manifestent sous l'influence d'une force unique ou de plusieurs forces ayant une résultante : la torsion dont nous voulons parler maintenant se produit sous l'influence d'un *couple*.

Considérons une tige AB (ou un fil) fixée invariablement, encastrée, à une de ses extrémités A et soumise à l'extrémité opposée à l'action d'un couple

dont le plan soit perpendiculaire à l'axe de la tige ; celle-ci, sous l'influence du couple, subira une torsion.

Pour préciser la nature de cette déformation, considérons une tige à section circulaire (les seules qui soient utilisées dans la pratique) sur laquelle nous déterminons une série de points situés sur une même génératrice avant l'action du couple. Lorsque celui-ci aura agi, nous observerons que ces points se seront tous écartés de leur position primitive : mais les déplacements sont inégaux : ils sont d'autant plus grands que le point considéré est plus éloigné de la section fixe d'encastrement. La loi qui régit ces déplacements est simple : ils sont proportionnels à leurs distances à la section fixe.

On peut énoncer ce résultat d'une façon plus facilement appréciable, car il revient à dire que les points qui étaient primitivement sur une même génératrice du cylindre se trouvent maintenant sur une hélice tracée sur ce cylindre.

Il importe de remarquer que, dans cette déformation, toutes les génératrices primitives sont transformées en hélices égales, d'une part ; d'autre part, l'axe ne subit aucun déplacement, et cela se conçoit, par raison de symétrie.

Considérons, sur la base à laquelle est appliqué le couple qui produit la torsion, un point quelconque, celui par exemple où aboutit la génératrice précédemment indiquée, et le rayon qui unit ce point au centre de la base. Après la déformation, ce rayon, passant toujours par le centre qui est resté immobile, a tourné d'un certain angle qu'on appelle *angle de torsion.*

D'après ce que nous venons de dire, on comprend que tous les rayons tournent du même angle qui, dès lors, caractérise la déformation.

La torsion obéit à des lois simples que nous allons résumer dans une formule.

Nous pouvons concevoir que le couple soit constitué par deux forces F égales, parallèles et de sens contraire, appliquées en deux points d'un diamètre de la base (soit à l'intérieur de cette base, soit à la périphérie, soit même en deux points extérieurs, pourvu que ceux-ci soient invariablement reliés à la base même), et soit d la distance de ces points : le produit Fd est ce que l'on appelle le *moment du couple.*

Soient, d'autre part, L la longueur de la tige, r le rayon de sa section, E un coefficient numérique, coefficient d'élasticité de torsion, qui dépend de la nature du corps, et soit enfin ω l'angle de torsion. Cet angle est déterminé par la formule

$$\omega = \frac{Fd.L}{Er^4}.$$

Quoique le coefficient E soit très grand, cette formule montre qu'une force donnée F, même petite, peut produire une torsion notable à la condition de donner à d et à L de grandes valeurs et de prendre au contraire r très petit.

De même que pour les déformations précédentes, si l'on mesure l'angle de torsion ω et si on connaît les données de l'expérience, on peut évaluer la grandeur de la force. De cette équation on tire en effet :

$$F = \frac{Er^4\omega}{dL}.$$

Si l'on fait avec la même tige, dans les mêmes conditions, une autre expérience en prenant seulement une force différente F', on pourra mesurer la torsion ω' et on aura de même

$$F' = \frac{Er^4\omega'}{dL}.$$

D'où l'on déduit

$$\frac{F}{F'} = \frac{\omega}{\omega'}.$$

C'est-à-dire que les forces sont proportionnelles aux angles de torsion. Cette propriété a été utilisée dans plusieurs appareils, dans la balance de Coulomb, notamment.

Il est important de remarquer que, tandis que les lois de la traction, de la compression et de la flexion ne peuvent être appliquées que pour de petites déformations, la formule qui donne la torsion, comme l'a montré Coulomb, est encore vraie pour une torsion qui atteint et même dépasse une circonférence, au moins lorsqu'il s'agit de tiges d'un petit diamètre.

Comme pour les déformations précédentes, il y a proportionnalité entre le déplacement et la force qui agit, et par suite entre le déplacement et la force élastique qui prend naissance à chaque instant. Aussi la conséquence est-elle la même, et le corps abandonné à lui-même après torsion oscille, et ses oscillations sont pendulaires : elles sont donc isochrones, leur durée est indépendante de la grandeur de la torsion. L'isochronisme, au moins pour les fils fins, subsiste même pour des torsions d'une ou de plusieurs circonférences.

Nous ne pourrons entrer dans l'étude des déformations qui se produisent lorsqu'un corps est soumis a l'action de forces agissant dans des conditions autres que les conditions simples que nous venons d'examiner.

Il est toutefois un corps d'une forme spéciale dont nous devons étudier les déformations, parce qu'il y en a de nombreuses applications : ce sont les *ressorts à boudin*.

Ces ressorts sont constitués par un fil rigide élastique enroulé en hélice. Supposons un ressort de ce genre fixé par une de ses extrémités et subissant à l'autre l'action d'une force parallèle à son axe. Sous l'influence de celle-ci, le corps se déformera ; mais on reconnaîtra, lorsqu'il sera arrivé à l'état d'équilibre, qu'il présente encore la forme d'une hélice. Le pas de cette hélice s'est accru, c'est-à-dire que les spires se sont écartées, si la force tendait à écarter les bases l'une de l'autre ; le pas de l'hélice aura diminué dans le cas contraire.

Si, comme il arrive quelquefois, les spires successives étaient primitivement en contact (c'est-à-dire si le pas de l'hélice était égal au diamètre du fil), il va sans dire qu'il pourra y avoir seulement écartement des spires, mais que toute force qui tendrait à rapprocher les bases serait sans action (à moins qu'elle ne soit suffisante pour écraser le fil ; mais alors il n'y aurait plus déformation *élastique*, ce qui est la condition que nous avons admise).

En cherchant à se rendre compte de la nature de la déformation, on voit que le fil élastique subit à la fois une flexion et une torsion, faibles l'une et l'autre, d'ailleurs.

Mais sans entrer dans le détail de ces déformations, appelons longueur du ressort la longueur de l'axe comprise entre ses deux bases et comparons les variations de cette longueur avec l'intensité des forces qui agissent : l'expérience montre qu'il existe une relation simple entre ces deux grandeurs.

Les variations de la longueur, allongement ou raccourcissement, sont proportionnelles à l'intensité des forces qui les ont produites et à la longueur du ressort.

En désignant par L cette longueur, par F la force et par l la variation de longueur, on a donc la formule

$$l = \text{KLF}$$

dans laquelle K est un coefficient qui dépend à la fois de la nature de la substance employée, du diamètre du fil et du diamètre du cylindre sur lequel a été enroulé le fil pour constituer l'hélice.

Il résulte de cette formule que la mesure de la variation de longueur peut servir à mesurer la force.

Les ressorts qui entrent dans la constitution des sommiers élastiques se comportent d'une manière analogue, quoique la forme soit moins simple : toutefois, il n'existe pas de relation de proportionnalité entre les forces et les variations de longueur.

Dans les déformations complexes, nous devons encore signaler le cas des corps creux non sphériques soumis à des pressions agissant, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur ; il y a en général plusieurs effets et notamment des flexions se produisant en chaque point, différemment dans les diverses directions.

Nous ne pouvons rien dire d'une manière générale : toutefois, si nous considérons le cas d'un cylindre à section elliptique ou ovale, on peut dire que les actions agissant à l'intérieur tendent à rapprocher la section de la forme circulaire, tandis que les pressions agissant à l'extérieur ont pour effet d'aplatir davantage le tube.

Si l'on prend un tube de ce genre, mais qu'on lui communique une courbure dans la direction de son axe, l'effet sera plus complexe : non seulement la section changera de forme, comme nous venons de l'indiquer, mais de plus ce changement aura pour effet de modifier la courbure de l'axe du tube. Cette remarque a été utilisée dans la construction des baromètres métalliques et de certains thermomètres enregistreurs.

DES CORPS ÉLASTIQUES COMME ACCUMULATEURS D'ÉNERGIE

Pour produire la déformation d'un corps, il faut dépenser une certaine quantité d'énergie, représentée, d'une part, par le travail de la force appliquée au corps et évalué d'après le déplacement de son point d'application, et d'au-

tre part par les variations de température que présentent les corps qui se déforment. Si l'on maintient le corps dans cet état de déformation, puis qu'on l'abandonne à lui-même, il rendra une partie de l'énergie qu'il avait reçue, celle qui correspond au travail mécanique; l'autre s'est dissipée parce que, généralement au moins, le corps se sera mis en équilibre de température avec le milieu ambiant. En réalité, il y aura encore une autre perte dans le travail mécanique recueilli, parce qu'une partie de celui-ci est utilisée à produire la modification de température que subit le corps en revenant à son état primitif.

On voit en somme que ce corps élastique a conservé, pendant tout le temps qu'il est resté déformé, une partie de l'énergie qu'il a reçue et qu'il rend en reprenant son état primitif: il est donc en réalité un accumulateur d'énergie. Suivant les expressions consacrées, il reçoit de l'énergie à l'état actuel, il la conserve à l'état potentiel tant qu'il reste déformé, pour la rendre à l'état actuel lorsqu'il revient à son état primitif. D'ailleurs, ainsi qu'il arrive pour tous les accumulateurs d'énergie, ces transformations ne sont pas intégrales, et il y a toujours une certaine perte.

L'emploi des corps élastiques déformés comme accumulateurs peut être commode dans certains cas, et nous en donnerons des exemples ; mais il n'est avantageux que lorsqu'il s'agit de mettre en jeu de petites quantités d'énergie, et il devient peu pratique lorsqu'on a à dépenser un travail mécanique un peu considérable : on a reconnu, en effet, à la suite de diverses expériences, qu'un ressort en acier ne peut emmagasiner au plus que 20 kilogrammètres par kilogramme de son poids.

TRANSMISSION DES ACTIONS BRUSQUES PAR LES CORPS ÉLASTIQUES

Lorsqu'un corps élastique subit une déformation, celle-ci se produit dans un temps variable à volonté, suivant que la force que l'on fait agir est plus ou moins intense : la dépense d'énergie reste la même naturellement, mais elle se répartit différemment dans le temps suivant les conditions de l'expérience.

Mais lorsque le corps déformé est abandonné à lui-même, il revient à son état primitif, sous l'influence des forces élastiques qui sont complètement déterminées ; ce retour à l'état primitif dépend donc de ces forces seulement, et par conséquent de la nature, de la forme et des dimensions du corps : sa durée est donc toujours la même pour une déformation déterminée (nous avons même dit que, entre certaines limites, en général, cette durée est indépendante de la grandeur de la déformation), elle est complètement indépendante de l'action déformatrice et de la durée de cette action.

Cette remarque, très importante, explique que toute action brusque qui se transmet par l'intermédiaire d'un corps élastique est transformée en une action progressive plus lente.

M. Marey a montré, par une expérience ingénieuse, que cette transformation est avantageuse au point de vue de la proportion d'énergie transmise.

L'appareil à l'aide duquel on peut rendre ce résultat sensible consiste en

un fléau de balance porté sur un pied et muni d'un cliquet qui glisse sur une roue à rochet, d'où résulte que le fléau s'incline librement dans un sens, mais ne peut tourner en sens contraire.

A une des extrémités, celle qui ne peut que s'élever, on suspend une grosse masse par l'intermédiaire d'un fil inextensible ; à l'autre extrémité, on suspend une petite sphère par un fil assez long.

On amène le fléau à l'horizontalité et il s'y maintient, même lorsqu'on tient

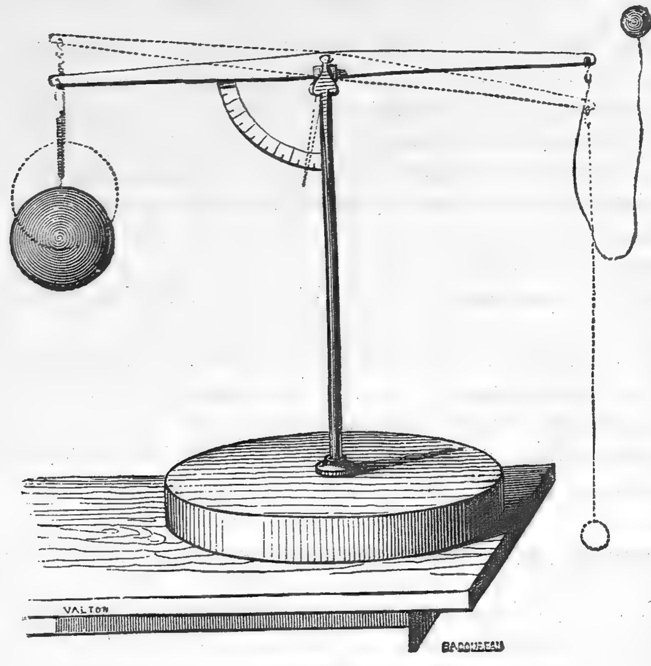


Fig. 65.

la petite sphère à la main et que, par suite, une seule force soit appliquée au fléau, parce que la roue à rochet l'empêche de céder à l'action de la grosse masse.

On laisse alors tomber la petite masse, qui acquiert une certaine vitesse, qui est brusquement réduite à zéro lorsque le fil est complètement tendu : la force vive que possédait cette sphère est transformée en travail mécanique qui est transmis par le fil au fléau, qui subit une secousse mais ne se déplace pas.

On change alors le mode de suspension de la grosse masse en la reliant au fléau par un fil de caoutchouc ou un ressort à boudin, et l'on recommence l'expérience en faisant tomber la petite sphère de la même hauteur que précédemment, de telle sorte que le travail mécanique communiqué au fléau a la même valeur ; on voit alors que, sous l'influence du choc produit, le fléau s'incline d'un certain angle : l'inclinaison augmente si on reproduit la chute de la petite sphère.

La même action mécanique a donc donné pour la grosse masse deux résultats différents : dans le premier cas, l'effet a été nul, et par suite aucun travail mécanique n'a été transmis ; dans le second cas, la transmission du travail s'est effectuée, puisque la grosse sphère a été soulevée. Ce ne peut être qu'à la substitution du fil élastique au lien inextensible qu'on peut attribuer cette différence.

APPLICATIONS DIVERSES DE L'ÉLASTICITÉ DES SOLIDES

Les applications qui ont été faites des déformations élastiques sont très nombreuses et très variées ; mais elles se rattachent toutes à trois notions générales que nous avons indiquées :

1° Les corps élastiques soumis à des forces se déforment et il y a des relations entre l'intensité des forces et la grandeur des déformations ;

2° Les corps élastiques en se déformant peuvent jouer le rôle d'accumulateurs d'énergie ;

3° Les corps élastiques transmettent les actions brusques et les transforment en actions progressives et par là évitent ou diminuent les pertes d'énergie mécanique.

Parmi les applications qui ont été faites de l'élasticité, nous devrons faire un choix, et nous signalerons seulement celles qui présentent quelque importance au point de vue des sciences biologiques.

Les phénomènes de variation de longueur par traction ou compression sont très faibles et n'ont pas été utilisés, sauf toutefois dans le cas du caoutchouc, dont l'allongement est, au contraire, très notable, sans que l'on atteigne la limite d'élasticité.

La propriété que possède ce corps, de revenir à ses dimensions primitives, est utilisée dans un certain nombre de cas ; par exemple, lorsqu'une pièce mobile autour d'un axe, après avoir été écartée d'une position déterminée, doit y être ramenée, on peut prendre un fil de caoutchouc, ou un faisceau de fils, suivant que la masse de la pièce mobile est plus ou moins grande ; on en attache une extrémité sur une partie fixe de l'appareil et l'autre sur la pièce mobile, de manière à tendre le caoutchouc lorsque celle-ci est déplacée ; un arrêt quelconque la maintient dans cette position. Lorsqu'on vient à supprimer, à écarter cet arrêt, la pièce mobile obéit à l'action de la force élastique développée dans le caoutchouc par son allongement, et revient à sa position première.

On peut faire varier à volonté, dans de certaines limites et pour une pièce mobile donnée, la rapidité du retour à la position de repos. Cette rapidité varie avec l'allongement du fil de caoutchouc d'une part, cet allongement étant compté à partir des dimensions que présente ce fil quand il n'est soumis à aucune force.

Le fil peut n'être pas tendu lorsque la pièce mobile est au repos ; ou bien, pour cette position il peut être déjà tendu. On voit que, dans ce dernier cas, la force qui agira sur la pièce mobile, quand celle-ci sera déplacée, sera plus grande que dans le premier cas : la pièce mobile reviendra donc plus rapide-

ment. On peut même faire varier la vitesse en changeant la tension initiale.

On peut arriver au même résultat sans modifier la tension initiale, mais en changeant la section du fil (ou en employant un faisceau de fils), puisque, d'après la formule, la force varie proportionnellement à la section lorsque les autres éléments restent les mêmes.

Cette disposition se rencontre dans un certain nombre d'instruments de physiologie; elle est également utilisée pour la manœuvre des obturateurs des chambres noires photographiques lorsqu'on veut prendre des vues dites instantanées.

Puisque, à une température donnée, il y a une relation déterminée entre la longueur d'un fil ou d'une bande de caoutchouc et la force qui la tend, on comprend qu'on puisse évaluer cette dernière en mesurant la longueur de la bande qui sert ainsi de dynamomètre.

C'est ainsi que l'on peut évaluer la force employée dans les appareils destinés à produire l'extension continue, pour obtenir et maintenir la réduction d'une luxation, par exemple. La traction, au lieu de se faire directement par

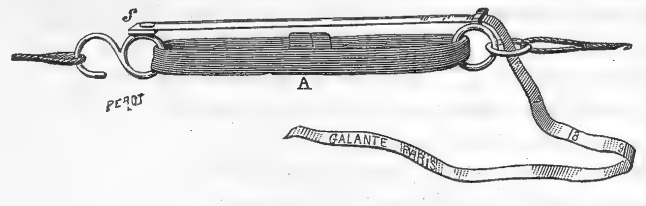


Fig. 66.

des liens inextensibles, se fait par l'intermédiaire d'un étrier de caoutchouc A (fig. 65).

Parallèlement à celui-ci, et fixé à une de ses extrémités, se trouve un ruban inextensible sur lequel sont tracées des divisions; ce ruban passe dans une coulisse située à l'autre extrémité de l'étrier; d'après la division qui se trouve en face de cette coulisse, on détermine la longueur de l'étrier. Par des expériences préalables, on a déterminé la valeur des forces, évaluées en kilogrammes, qui correspondent aux diverses longueurs, et ce sont ces nombres qui sont inscrits sur la bande inextensible. On a donc la valeur de la tension par une simple lecture.

Il est intéressant d'ajouter que les actions transmises au patient lorsqu'on produit l'extension varient d'une manière plus continue et avec moins de secousses que si l'on agissait par l'intermédiaire d'un lien inextensible.

Les applications des compressions élastiques sont peu nombreuses et se bornent à peu près à l'emploi du caoutchouc pour diminuer l'effet des secousses brusques.

C'est ainsi que, dans certaines voitures de tramways, on a interposé des cylindres de caoutchouc entre les coussinets des roues et le châssis qui porte la caisse de la voiture : par le poids de celle-ci, le caoutchouc se comprime; la compression augmente par les actions brusques que subissent les roues, mais le caoutchouc ne transmet à la caisse que des secousses adoucies.

C'est une action entièrement analogue qui se produit pour les caoutchoucs pleins, que l'on adapte aux roues des bicyclettes et des voitures. Mais l'épaisseur de ces pièces étant assez faible, l'action élastique est modérée, et les secousses brusques ne sont pas complètement amorties.

Les variations de volume des capacités dont les parois sont élastiques sous l'influence des pressions s'observent, par exemple, pour les thermomètres qui sont plongés dans un liquide comprimé. Sous l'influence de celui-ci, la capacité du réservoir diminue et, même sans changement de température, le niveau du liquide s'élève dans la tige; s'il y a variation de température, le changement de niveau est dû à l'ensemble des deux actions, et l'on conçoit que, pour évaluer la température, il y ait lieu de faire une correction relative à l'action de la pression.

Pour le verre et pour les métaux, ces changements de volume sont toujours très petits et peuvent être négligés dans la plupart des cas ; il n'en est pas de même pour le caoutchouc, qui se dilate beaucoup sous l'influence des pressions intérieures.

Cette propriété est mise à profit pour provoquer l'avortement dans les cas où il est reconnu nécessaire de produire l'accouchement prématuré artificiel. On introduit dans le col de l'utérus un ballon de caoutchouc dont on a chassé tout l'air par pression, et qu'on a plié de manière à présenter la forme d'une sorte de cylindre de la plus petite section possible ; à ce ballon est fixé un tube muni d'un robinet par lequel on introduit de l'air ou de l'eau tiède. On produit d'abord le déplissement de la paroi, et le ballon acquiert son volume normal, puis on augmente la pression et on dépasse ce volume par la dilatation que subit le caoutchouc.

C'est également la dilatation par pression intérieure qui intervient dans l'emploi des pneumatiques qui sont adaptés maintenant à presque toutes les bicyclettes et à un certain nombre de voitures. Le sac à air, qui est constitué par une enveloppe fermée et est maintenu par le bandage plus résistant, est rempli d'air, de manière à tendre absolument le bandage, de telle sorte que la section du tube est partout sensiblement la même. Mais si on pèse sur les bicyclettes, en montant dessus, par exemple, on déforme le bandage au point où il touche le sol, on l'aplatit, ce qui diminue la section et, par suite, le volume correspondant ; l'excès d'air chassé de cette partie se répand dans le reste du sac à air, augmente la pression qui y existait et provoque une augmentation de section, la forme de celle-ci restant circulaire. Par le mouvement de la roue, toutes les parties sont ainsi alternativement comprimées et dilatées.

L'action de l'élasticité intervient dans ce cas pour diminuer la quantité de travail nécessaire pour produire un déplacement donné, parce que l'action motrice, action des pieds sur les pédales, n'est pas constante. D'après ce que nous avons dit, on pouvait prévoir ce résultat qui a été mis en évidence par M. Michelin, qui a comparé le travail nécessaire pour déplacer dans les mêmes conditions de chemin et de vitesse des voitures dont les unes avaient des jantes ordinaires et les autres des jantes munies de pneumatiques.

Si une roue munie d'un pneumatique rencontre un obstacle, un corps qui

dépasse le niveau de la route, il en résultera une action brusque qui produit une déformation, brusque également, du pneumatique; mais, comme conséquence de l'élasticité de celui-ci, l'effet est transmis à la bicyclette même et au cycliste, moins brusquement: il y aura amortissement des secousses. C'est un fait qui est trop connu maintenant pour qu'il soit nécessaire d'insister.

Les déformations subies par les corps élastiques, tels que les métaux, lors de la flexion, sont beaucoup plus considérables que celles produites par la traction et la compression, sauf dans le cas, très rare d'ailleurs, de double encastrement. Elles donnent lieu à des applications parmi lesquelles nous signalerons celles qui nous semblent les plus intéressantes.

On a utilisé la flexion des corps élastiques pour la mesure des forces dans divers appareils. Le peson qui sert à déterminer approximativement le poids des corps est constitué par une lame d'acier courbée en forme d'U couché; à chaque extrémité est fixée un arc métallique rigide qui traverse librement l'autre branche. L'un de ces arcs porte un anneau par lequel on suspend le peson; l'autre est terminé à sa partie inférieure par un crochet auquel on suspend le corps à peser. Sous l'influence du poids de ce corps, la lame se fléchit, les extrémités se rapprochent d'autant plus que le poids est plus considérable : ce rapprochement est évalué à l'aide de divisions qui ont été tracées sur l'un des arcs; par des opérations préalables effectuées à l'aide de poids marqués, on sait à quels poids correspondent ces divisions, et ce sont les nombres représentant ces poids qui sont inscrits en face de chaque division, de sorte que l'évaluation du poids se fait par une simple lecture.

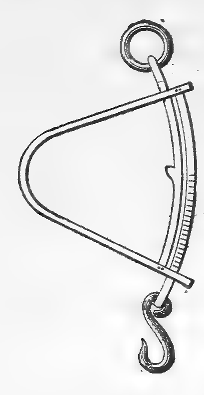


Fig. 67.

Pour éviter que, sous l'action d'un poids trop considérable, la limite d'élasticité ne soit dépassée et que l'appareil, subissant une déformation permanente, ne puisse plus être utilisé, un arrêt porté par l'un des arcs métalliques empêche que le rapprochement des lames ne dépasse une certaine valeur.

Il existe des dynamomètres, basés sur le même principe, mais de forme différente : ils sont composés de deux lames élastiques placées parallèlement et maintenues dans cette position par des brides reliant les extrémités voisines. Au milieu de ces lames et extérieurement, sont fixés des anneaux ou des crochets à l'aide desquels on interposera le dynamomètre entre une corde, par laquelle se transmettra la traction, et un point fixe ou un point du corps qui doit être entraîné par l'action de la force. Lorsque celle-ci agira, les lames, retenues à leurs extrémités, fléchiront et leurs milieux s'écarteront; une pièce graduée fixée en cet endroit permettra d'évaluer l'écart qui est lié à l'intensité de la force en expérience.

On donne généralement aux lames une forme spéciale : leur section est terminée par une ligne droite d'un côté et est formée de l'autre par des arcs de parabole dont les sommets sont aux extrémités. Cette disposition présente

le grand avantage que les flexions des lames, et par suite les variations de leur distance, sont proportionnelles aux forces.

Ce dynamomètre a été transformé en appareil enregistreur : à cet effet, l'une des lames porte un rouage d'horlogerie qui fait tourner un cylindre dont l'axe est perpendiculaire à la direction des lames, tandis que l'autre lame porte un style, crayon, pinceau ou plume, qui appuie sur le cylindre. Tant que l'appareil est au repos, le style trace sur le cylindre une section droite qui, par développement de la feuille de papier couvrant le cylindre, donne une ligne droite perpendiculaire aux génératrices. Mais ces courbes changent de forme quand le dynamomètre subit l'action d'une force. Si l'on a employé un papier quadrillé, comme cela se fait en général, on a à la fois l'indication du temps et celle de l'intensité de la force. On peut donc aisément étudier les variations de celle-ci.

Dans certains cas, le mouvement du cylindre, au lieu d'être produit par un rouage d'horlogerie, est communiqué par les roues du véhicule auquel le dynamomètre est attaché : le déplacement de la feuille de papier est alors proportionnel au chemin parcouru et l'on reconnaît alors que l'aire des courbes tracées sur le cylindre est proportionnelle au travail mécanique transmis par le moteur.

Cet appareil a été employé notamment pour étudier les efforts produits par les moteurs animés employés à la traction des véhicules.

On a souvent besoin en clinique, principalement pour les maladies nerveuses, de se rendre compte de la pression que peut exercer un malade avec sa main. Les indications obtenues en faisant serrer la main de l'observateur sont naturellement très vagues et il y a avantage à tous égards à avoir un moyen précis d'évaluation. On emploie pour cela des dynamomètres dont il existe plusieurs modèles, différant par des détails, mais reposant tous sur le même principe. Le dynamomètre est constitué par un anneau en acier, de forme elliptique : on le place dans la main de manière que la pression s'exerce dans la direction du petit axe. Sous l'influence de cette pression, l'ellipse se déforme, s'aplatit et la diminution de longueur croît avec l'intensité de la pression. Pour évaluer cette variation, à l'un des sommets du petit axe est fixé un cadran, sur lequel se meut une aiguille dont l'axe porte un pignon : à l'autre sommet est fixée une crémaillère qui engrène avec le pignon. Quand les sommets se rapprochent, la crémaillère fait tourner le pignon qui entraîne l'aiguille : la position prise par celle-ci sur le cadran est donc liée à la grandeur de la force.

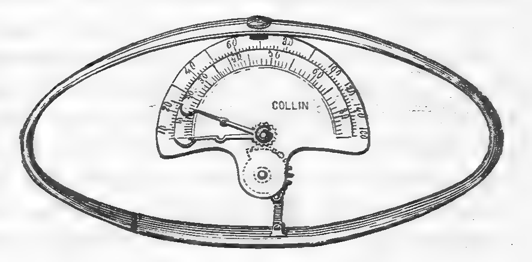


Fig. 68.

Le cadran porte des divisions et par des mesures directes on a pu inscrire en face de chacune d'elles l'intensité de la force correspondante.

Comme il s'agit, en général, de déterminer l'effort maximum qui peut ne

se manifester que pendant un temps très court ; que, d'ailleurs, la lecture est difficile pendant que l'appareil est en fonction, on a disposé sur l'axe de l'aiguille une seconde aiguille, folle, pouvant être entraînée par la première pendant la déformation du dynamomètre, mais non pendant que celui-ci reprend sa forme primitive.

Cette aiguille folle, pour chaque expérience, indique donc le déplacement maximum de l'autre aiguille, ce que l'on veut connaître. Il va sans dire que, après chaque lecture, l'aiguille folle doit être ramenée au zéro.

Les lames élastiques fléchies sont très souvent employées comme accumulateurs d'énergie.

Il nous suffira de dire que les ressorts qui mettent en mouvement tous les rouages d'horlogerie, notamment tous ceux qui sont employés dans les appareils de physiologie, sont des lames élastiques enroulées en spirale et qu'on bande, suivant l'expression consacrée, en augmentant leur courbure, ce qui exige une certaine dépense d'énergie.

Lorsqu'on leur permet de revenir à leur forme primitive, elles restituent, au moins en grande partie, l'énergie qu'elles avaient emmagasinée, et communiquent un mouvement aux pièces mobiles du rouage.

Il faut remarquer que l'action ainsi produite est loin d'être constante : la force développée, grande quand le ressort commence à se débander, diminue progressivement. Aussi le mouvement produit n'est-il pas uniforme. Pour le régulariser, il faut employer un organe spécial : dans les horloges, c'est le pendule, dont on utilise l'isochronisme des oscillations ; nous ne pouvons entrer dans le détail du mécanisme dont le principe est d'ailleurs facile à comprendre.

Dans les montres et les rouages d'horlogerie, ce rôle de régulateur est dévolu au spiral : c'est encore un ressort de forme spirale, qui oscille de part et d'autre de sa position d'équilibre et dont les oscillations sont également isochrones.

Dans quelques cas, le ressort qui est destiné à restituer l'énergie qu'il a reçue est constitué par une simple tige élastique encastrée à une extrémité et dont on écarte l'autre extrémité d'une certaine quantité ; lorsque celle-ci sera abandonnée à elle-même, elle reviendra à sa position d'équilibre en entraînant les pièces mobiles sur lesquelles elle est appuyée.

Cette disposition est appliquée dans le staphylotome dans lequel la lame tranchante qui coupe la luette est entraînée par l'action d'un ressort fléchi.

Il importe de remarquer que l'on peut graduer à volonté, au moins dans une certaine mesure, la grandeur de la force mise en jeu.

Pour un même ressort, elle croît avec la flèche qui lui est communiquée. Mais si le déplacement doit rester le même, on peut faire croître la force, par exemple, en diminuant la longueur de la partie qui fléchit, c'est-à-dire en déplaçant convenablement le point d'encastrement.

La flexion des corps élastiques est très fréquemment utilisée pour amortir les secousses brusques : les ressorts à l'aide desquels on suspend les voitures sont en somme des lames élastiques (ou des assemblages de lames élastiques) dont le milieu est encastré dans une pièce portée par l'essieu des

roues et aux extrémités desquelles est suspendue la caisse de la voiture. Il est inutile d'insister sur le mode d'action de ces ressorts, l'action étant analogue à celle que nous avons indiquée plus haut.

Dans les chemins de fer, les wagons ne sont pas reliés entre eux d'une manière rigide : les barres d'attelage par lesquelles se fait la réunion des voitures sont fixées non pas directement à la caisse de celles-ci, mais bien par l'intermédiaire de ressorts analogues comme forme et comme disposition aux ressorts de voiture, mais placés, naturellement, de manière à agir horizontalement.

Non seulement l'existence de ces ressorts a pour but d'amortir les secousses au moment du démarrage ou de l'arrêt, mais de plus ils produisent une économie d'énergie, lorsque le mouvement présente des causes d'irrégularité.

Les phénomènes de torsion ont été utilisés dans diverses circonstances comme moyen de mesure des forces ou plutôt des couples : nous signalerons notamment la balance de torsion à l'aide de laquelle Coulomb a étudié les lois du magnétisme et de l'électricité, et les expériences de Cavendish sur l'attraction des corps entre eux.

Ils constituent un moyen précieux de mesurer des forces de très faible intensité, parce que, comme nous l'avons indiqué, de semblables forces peuvent produire des torsions très appréciables en choisissant convenablement le fil à l'aide duquel on opère.

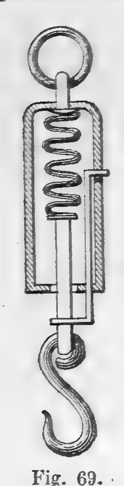
Ajoutons que la torsion des fils est également utilisée, pour la même raison, pour suspendre les aiguilles des galvanomètres. On sait que, dans ce cas, on emploie le plus souvent des fils de cocon. Dans ces dernières années, on a remplacé ceux-ci, pour les appareils de grande précision, par des fils obtenus en étirant le quartz fondu, fils dont le diamètre peut descendre jusqu'à $0^{mm},025$, ce qui permet d'obtenir une extrême sensibilité.

Comme les autres déformations, la torsion peut servir à emmagasiner de l'énergie : on a utilisé cette propriété surtout en se servant d'un fil de caoutchouc, ou plutôt d'un faisceau de fils de caoutchouc. Une des extrémités de ce faisceau est maintenue fixée, tandis que l'autre, reliée à une tige ayant la même direction et qui ne peut que tourner sans glisser, est soumise à l'action d'un couple, à l'aide d'une manivelle par exemple. Cette extrémité étant maintenue fixe à son tour, après que la torsion a été effectuée, si l'autre est rendue libre elle se mettra à tourner, entraînant avec elle les pièces mobiles auxquelles elle peut être reliée, et le mouvement se continuera jusqu'à ce que la torsion ait disparu.

Ce genre de moteur a été appliqué dans ces dernières années à un grand nombre de jouets d'enfants : il avait été utilisé auparavant pour la construction d'oiseaux mécaniques (Penand), le mouvement produit par la détorsion étant employé à produire le battement des ailes.

Les ressorts à boudin ont été employés dans un grand nombre d'applications qu'on peut aisément imaginer, puisque, abstraction faite de la complexité réelle de leur déformation, ils obéissent à la traction et à la compression, à peu près comme le feraient des corps très élastiques de forme cylindrique.

Aussi les a-t-on utilisés, par exemple, à la mesure des poids dans certains pesons. Dans ces appareils, un ressort à boudin est enfermé dans un cylindre creux et fixé par une extrémité à la base supérieure de celui-ci, qui porte un anneau par lequel on supporte ou suspend l'appareil; à la partie inférieure du ressort est attachée une tige qui traverse l'autre base et à laquelle on suspend le corps à peser, par l'intermédiaire d'un crochet. Les allongements du ressort sont appréciés à l'aide d'un index porté par la tige de suspension, et qui, traversant une fente faite suivant une génératrice, se déplace sur une échelle graduée. La graduation est faite par comparaison ; mais, à cause de la proportionnalité que nous avons signalée plus haut, les divisions sont également espacées.


Fig. 69.

Les ressorts à boudin sont fréquemment employés à ramener à sa position primitive une pièce mobile qui en a été écartée : ils rendent ainsi l'énergie qui avait été dépensée pour produire le déplacement et se comportent absolument comme le caoutchouc que nous avons signalé précédemment.

DES DÉFORMATIONS PERMANENTES

Les effets qui se manifestent lorsque, par l'action de forces sur un corps, on a dépassé la limite d'élasticité de celui-ci, doivent être considérés à deux points de vue différents : d'abord la déformation qui se produit pendant que la force agit, puis la déformation qui subsiste lorsque la force a cessé d'agir.

Nous avons peu de chose à dire sur la déformation qu'on observe pendant l'action de la force : aucune loi n'a été trouvée et l'on peut seulement dire, d'une manière générale, que la déformation est plus grande que celle qui serait donnée par l'application de la formule de la déformation élastique.

Si l'on fait agir successivement des forces d'intensité croissante, la déformation croît de plus en plus rapidement en général, puis le corps se réduit en fragments, se brise. Nous étudierons ultérieurement cette action.

Si, au contraire, avant que ce résultat soit atteint, on vient à supprimer l'action de la force, la déformation diminue, le corps se rapproche de son état primitif sans jamais y revenir (puisque nous supposons qu'on a dépassé la limite d'élasticité), il subsiste une *déformation permanente*.

Sans qu'il y ait de relation générale entre la grandeur de cette déformation permanente et l'intensité de la force qui a agi, on peut dire cependant que, pour un corps donné, la déformation qui subsiste est d'autant plus grande que l'intensité de la force était plus considérable, que, par suite, la déformation passagère qu'elle avait produite avait été aussi plus considérable.

La limite d'élasticité peut être dépassée sous l'influence d'une force agissant continûment, mais il peut en être de même d'une action brusque ; une secousse, un choc, peut produire le même résultat et amener une déformation passagère et ultérieurement une déformation permanente. Dans ce cas, ce n'est pas simplement la grandeur de la force qui détermine celle

de l'effet produit, c'est la quantité d'énergie, de travail mécanique possédée par le corps au moment où la déformation a atteint sa plus grande valeur, c'est la vitesse du corps qui produit le choc.

CHARGE DE RUPTURE OU D'ÉCRASEMENT

Lorsqu'on soumet un corps à des forces croissantes, on arrive à produire, non plus des déformations plus ou moins considérables pour lesquelles le corps ne cesse pas d'être continu, mais la subdivision en fragments, la rupture. Celle-ci peut se produire à la suite de déformations de nature quelconque, mais nous nous occuperons seulement de quelques cas simples.

Considérons d'abord le cas d'une tige prismatique ou cylindrique soumise à une traction. En même temps qu'elle s'allonge, ainsi que nous l'avons dit, elle subit une diminution de section. En général, cette diminution ne se produit pas uniformément et il existe une région où la section présente un minimum : c'est dans cette région que, si la force a atteint une valeur suffisante, il se produit une séparation, une rupture.

Si l'on opère avec des tiges de section différente, on reconnaît, comme on pouvait le prévoir, que pour produire la rupture il faut, en général, une force d'autant plus intense que la section est plus grande. Si les corps sont homogènes, on observe que les forces qui produisent la rupture sont proportionnelles aux sections; si F et F' sont les forces, s et s' les sections, on a

$$\frac{F}{F'} = \frac{s}{s'};$$

d'où l'on déduit

$$\frac{F}{s} = \frac{F'}{s'}.$$

Mais chacun de ces quotients mesure la charge par unité de section : la rupture se produit donc pour une valeur déterminée de cette charge quelle que soit la section : c'est ce qu'on appelle la *charge de rupture*. Elle est exprimée généralement en kilogrammes par centimètre carré ou par millimètre carré.

On dit d'un corps que sa ténacité est d'autant plus grande que cette charge de rupture est plus élevée.

Quelquefois, on se borne à indiquer l'ordre de ténacité des corps; mais on n'a ainsi qu'une notion incomplète et il est préférable de donner la valeur numérique dont d'ailleurs la connaissance est utile au point de vue des applications.

Nous donnons ci-dessous la valeur de la charge de rupture pour quelques corps usuels; elle est exprimée en kilogrammes par millimètre carré :

Acier	75 à 110	Étain	8
Fer	79	Zinc	4
Cuivre	44	Plomb	3
Platine	39	Cordes	5 à 8
Argent	27	Bois dur	6 à 12
Or	22		

Lorsque les corps soumis à la traction ne sont pas homogènes, il n'y a pas de relation simple entre la section et la force qui amène la rupture ; on ne peut donc plus introduire la notion de charge de rupture. Aussi, lorsqu'on cherche cette donnée, trouve-t-on des valeurs différentes pour les divers échantillons : il convient alors de se borner à indiquer les valeurs extrêmes, maximum et minimum, entre lesquelles sont comprises les valeurs fournies par les expériences.

Lorsqu'on exerce une compression croissante sur un bloc prismatique, celui-ci finit par se réduire en fragments : il y a *écrasement*. La manière dont se fait la rupture, la forme des fragments varient avec la nature du corps et ne présentent rien d'intéressant qui doive nous arrêter.

Comme pour les ruptures par traction, dans le cas d'un corps homogène, on trouve que la force qui produit ainsi la rupture est proportionnelle à la section, ce qui revient à dire comme précédemment que, quelle que soit la section, il faut, pour produire l'écrasement, la même force par unité de surface.

Si le corps, de forme prismatique ou cylindrique, présente une longueur qui dépasse dix fois environ le côté ou le diamètre de sa section, le phénomène se manifeste autrement en général. Sous l'influence de la force qui le comprime, le corps ne reste pas rectiligne, il s'incurve : la flèche qu'il prend croît avec la grandeur de la force, et la rupture qui se produit alors est une rupture par flexion, ce n'est plus un écrasement.

La flexion que l'on observe alors est d'autant plus considérable que, pour une section donnée, la tige est plus longue : elle se produit plus facilement dans les corps hétérogènes que dans les corps homogènes.

Voici, pour quelques corps, la valeur de la charge d'écrasement en kilogrammes par millimètre carré :

Bonnes briques..........	1,5	Plomb..................	5
Bois divers..............	2 à 5,5	Étain....................	10
Marbre................	7,0	Fer......................	25
Pierre de Château-Landon.	9,5	Cuivre..................	70
Basalte.................	20,0	Fonte...................	75

La rupture d'un corps, son écrasement, peuvent être déterminés par l'action continue d'un poids dont on fait croître la valeur; c'est à ce cas que se rapportent les nombres que nous avons cités; mais un corps pesant agissant par action brusque, par choc, peut produire le même effet tout en ayant une valeur beaucoup moindre. Ici, comme dans toutes les actions mécaniques, intervient la vitesse possédée par le corps et, par conséquent, la force vive dont il est animé.

On n'a pas de donnée précise sur la rupture par flexion : cependant, d'une manière générale, pour un corps donné, elle se produit quand la flèche a atteint une valeur déterminée. Il en résulte que toutes les circonstances qui diminueront cette flèche auront pour effet de faire croître la valeur de la force capable d'amener la rupture.

A égalité de poids, un corps creux supportera donc sans rompre l'action d'une force qui amènerait la rupture d'un corps plein; de même un corps

à section en T ou en double T se rompra moins aisément que s'il avait une section rectangulaire.

Parmi les modes de rupture intéressants à signaler et qui ne se rattachent pas aux déformations simples, nous devons signaler le *cisaillement* dans lequel, sous l'influence de deux forces opposées agissant de part et d'autre du corps, les deux parties qui se séparent glissent l'une sur l'autre. C'est l'effet qui se produit, par exemple, lorsqu'on se sert d'une paire de ciseaux pour couper une feuille de papier ou une feuille de carton ; il est facile d'observer le déplacement en sens contraire des deux parties qui se séparent. En employant des forces assez intenses, on peut couper par cisaillement des lames métalliques présentant une grande épaisseur.

C'est une action analogue qui se produit dans l'emploi de l'emporte-pièce, dans celui des machines à percer à l'aide desquelles on pratique les trous pour le passage des rivets dans les feuilles de tôle, etc.

C'est une action analogue encore, quoique les circonstances soient différentes, qui se produit dans certains chocs brusques :

Lorsqu'on presse d'une manière continue sur une feuille de papier étendue, sur un carreau de verre, on produit une déformation par flexion ; si l'on fait croître la pression, on provoque la rupture qui se produit par une série de séparations correspondant aux lignes de moindre résistance de la feuille.

Il en sera de même si on lance un corps dur avec une certaine vitesse : si celle-ci est assez grande, la rupture se fera de la même façon.

Mais si la vitesse est très grande, l'action n'aura pas le temps de se propager aux parties voisines, même immédiatement, des points touchés : ces parties resteront indéformées comme si elles étaient appuyées de l'autre côté sur un obstacle fixe ; la partie qui a directement reçu le choc est entraînée par l'action du corps en mouvement, et se sépare par cisaillement, laissant une ouverture à bords nets, la continuité du corps subsistant alentour.

Lorsqu'un corps creux est rempli d'un liquide ou d'un gaz sous pression, si celle-ci vient à croître suffisamment, il se produira une rupture qui est analogue à la rupture par traction ; quelquefois un fragment plus ou moins étendu sera détaché et pourra même être projeté à distance ; d'autres fois, au contraire, il se produira une simple ouverture, une fente même qui suffira pour laisser écouler du liquide ou du gaz, ce qui amènera rapidement une diminution de pression.

Des effets de ce genre peuvent se produire notamment dans les chaudières à vapeur et dans les réservoirs, assez fréquemment employés maintenant, qui servent à contenir des gaz comprimés ou liquéfiés ; comme ces effets peuvent occasionner des accidents graves, il est nécessaire de donner aux parois une épaisseur assez grande que l'on détermine par une formule qu'il est sans intérêt de reproduire, de manière à être de beaucoup supérieure à celle qui théoriquement serait suffisante pour résister à la pression ; de plus, on soumet effectivement ces vaisseaux à des pressions beaucoup plus grandes que celles qu'ils devront supporter effectivement, ce qui donne une réelle sécurité : il convient cependant de ne pas opérer avec une pression trop considérable, car

on pourrait arriver à dépasser la limite d'élasticité et l'essai aurait alors pour effet d'affaiblir la résistance des parois.

Divers auteurs ont fait des expériences pour déterminer à quelles pressions peuvent résister les artères et les veines (Hales, Wintringham, Bouland, etc.); mais les résultats ne présentent aucune concordance, ce qui s'explique par les variations de constitution des tissus, le manque d'homogénéité. Cependant, les valeurs trouvées ont été généralement supérieures à 2 atmosphères : les résultats n'ont donc pas grand intérêt, car de semblables pressions ne peuvent guère être atteintes dans l'organisme.

Cependant, on peut observer des exemples de rupture de ce genre dans quelques cas : c'est ainsi que, lorsque l'on ramène rapidement à la surface de la mer un poisson pris à une assez grande profondeur, les gaz contenus dans la vessie natatoire ne peuvent pas se mettre en équilibre avec la pression décroissante des couches que le poisson traverse; ces gaz conservent donc la pression considérable qu'ils possédaient et qui était égale à celle de la couche d'eau où ils se trouvaient : mais en traversant les couches supérieures, cette pression n'est plus contre-balancée par la pression exercée extérieurement par le liquide et, souvent alors, la vessie se rompt en produisant de graves désordres dans l'organisme de l'animal.

Il serait intéressant de rechercher quelle pression est nécessaire pour produire la rupture des artères athéromateuses, des sacs anévrysmaux; cette pression doit être peu élevée, puisque l'on sait que l'on observe des ruptures spontanées dans ces cas.

APPLICATIONS DES DÉFORMATIONS PERMANENTES

La possibilité de produire dans un corps une déformation permanente est précieuse et est constamment utilisée dans l'industrie.

Ces déformations permanentes sont obtenues dans des conditions diverses.

Tantôt la force agit d'une manière continue comme dans le laminage ou dans l'estampage par pression; tantôt l'action se produit par des chocs comme dans le martelage, l'estampage par chocs, la frappe des monnaies.

Tous les corps ne se déforment pas avec la même facilité par l'emploi des procédés que nous venons d'indiquer; c'est ce que l'on exprime en disant qu'ils ne sont pas tous également *malléables*, qu'ils n'ont pas la même *malléabilité*.

On a établi pour les métaux des listes dans lesquelles ils sont rangés par ordre de malléabilité croissante : l'une se rapporte à la manière dont ils se comportent sous l'aciion du laminoir (I), l'autre correspond à l'action du marteau (II).

I. — Or, — Argent, — Aluminium, — Cuivre, — Étain, — Plomb, — Zinc, — Platine, — Fer, — Cobalt, — Nickel, — Palladium.

II. — Plomb, — Étain, — Or, — Zinc, — Argent, — Aluminium, — Cuivre, — Fer.

On n'a pas cherché à établir de listes analogues pour les corps autres que les métaux.

La température a une grande influence : d'une manière générale, on peut dire que la malléabilité augmente quand la température s'élève ; ainsi pour le fer, par exemple, ce n'est jamais qu'à la température du rouge qu'on agit, soit par l'action du marteau dans le forgeage, soit par celle du laminoir.

Cette action n'est pas générale cependant et le zinc, par exemple, est plus cassant à 200° qu'à la température ordinaire.

On dit qu'on soumet un corps à la *trempe* lorsque, après l'avoir chauffé, on l'introduit brusquement dans une masse de liquide froid, l'eau en général, quelquefois le mercure, l'huile. Par ce mode particulier de refroidissement, les propriétés élastiques sont changées : l'acier, par exemple, devient plus cassant ; le bronze des tam-tams, cassant à froid, devient malléable ; en même temps, le plus souvent, le métal acquiert à sa surface une plus grande dureté.

Si l'on chauffe un corps qui a été trempé, puis qu'on le laisse refroidir lentement, opération qui constitue le *recuit*, on ramène le corps à ses propriétés premières : le recuit détruit les effets de la trempe.

Lorsqu'on veut obtenir avec les métaux des cylindres de petites dimensions, des fils, surtout lorsque le diamètre est tel que le fil cesse d'être rigide, on ne peut employer l'action du laminoir et il faut avoir recours à la filière.

Les déformations par le passage à la filière ne sont pas également faciles à obtenir pour tous les corps ; c'est ce qu'on exprime en disant qu'ils ne sont pas également *ductiles*, qu'ils n'ont pas la même *ductilité*.

Quoiqu'il s'agisse dans cette opération d'obtenir une déformation permanente, l'ordre de ductilité n'est pas le même que dans l'ordre de malléabilité. Cela tient à ce que la ténacité doit également intervenir, puisqu'il faut que le corps résiste à la traction qu'il subit.

Voici l'ordre dans lequel on a rangé les métaux usuels au point de vue de la ductilité :

Or, — Argent, — Platine, — Aluminium, — Fer, — Nickel, — Cuivre, — Palladium, — Zinc, — Étain, — Plomb.

Il n'y a pas intérêt, en général, à élever la température des métaux pour le passage à la filière, parce que si, d'une part, la déformation est rendue plus facile, d'autre part la ténacité est diminuée.

Lorsqu'un métal ou un alliage métallique a été soumis à des conditions dans lesquelles la limite d'élasticité a été dépassée, dans lesquelles il a subi des déformations permanentes, sa constitution moléculaire a été changée, non seulement en ce que, en général au moins, sa densité a été augmentée, mais aussi en ce que son élasticité a été modifiée, diminuée ; il est devenu plus cassant. On dit alors qu'il est *écroué*, qu'il a subi l'*écrouissage*.

Le plus souvent, on peut lui rendre son élasticité première, au moins en grande partie, en le soumettant à l'action du *recuit*.

Lorsqu'on veut produire dans un corps une déformation permanente très notable, on ne peut y arriver, en général, en une seule opération : il faut faire passer le fil dans des filières de diamètres progressivement décroissants, il faut employer pour l'estampage des séries de matrices passant progressivement aussi de la forme primitive à celle que l'on veut obtenir finalement. En

général, ces opérations successives ne peuvent s'exécuter sans soumettre le corps à un ou plusieurs recuits, sans quoi il se briserait.

DE LA PLASTICITÉ

Il existe des corps qui se laissent déformer avec une extrême facilité et qui, d'autre part, jouissent de la propriété de se réunir complètement, d'adhérer absolument après qu'ils ont été séparés en fragments, même sous l'influence de très faibles pressions : ces corps sont dits *plastiques*.

L'argile peut être prise comme type des substances plastiques à la température ordinaire et c'est ce qui explique qu'on l'utilise pour le modelage.

La plasticité peut ne se manifester qu'à une température déterminée; c'est ce qui se présente, par exemple, pour la cire à modeler, très dure quand elle est froide, et se ramollissant, devenant plastique lorsqu'on l'échauffe en la pétrissant entre les doigts; tel est aussi le cas de la gutta-percha qui devient plastique vers 60°; on peut obtenir facilement un moulage avec ces substances en les échauffant, et comme elles se durcissent et deviennent difficilement déformables à la température ordinaire, elles conservent la forme qu'elles ont reçue. Cela explique l'emploi très fréquent qu'on en fait pour des moulages.

Le fer et le verre deviennent également plastiques au rouge, ce qui permet de les travailler aisément, et c'est là une des causes des usages très variés auxquels on les emploie.

Lorsqu'on prend un corps de composition déterminée et de constitution homogène, il présente, dans les mêmes conditions de température, de trempe et de recuit, des propriétés élastiques toujours identiques à elles-mêmes et caractéristiques du corps.

Mais il est très important de remarquer que ces propriétés peuvent être grandement modifiées par des changements de composition chimique même très minimes, par la présence de très faibles proportions de substances étrangères. Nous avons à peine besoin de signaler les différences entre le fer et l'acier dont la composition ne diffère que par une petite quantité de carbone; la présence de traces de soufre ou de phosphore rend le fer cassant, etc.

Jusqu'à ces dernières années, les substances qui restaient dans les métaux employés dans l'industrie avaient pour effet de diminuer les qualités utiles de ces corps et pouvaient être considérées comme des impuretés. Mais on a étudié avec soin les effets produits et on a reconnu qu'on pouvait améliorer l'élasticité et les autres propriétés des métaux par l'addition d'autres corps convenablement choisis en faible proportion; aussi est-on arrivé à constituer de nouveaux corps différant très peu, par exemple, du fer ou de l'acier et possédant un degré de ténacité ou d'élasticité fixé à l'avance et différant de celui du métal pur.

ARCHITECTURE DES OS

Par M. GARIEL

Les organismes vivants sont constitués par des parties liquides et solides; parmi ces dernières, il en est, comme les muscles, qui possèdent des propriétés spéciales qui seront étudiées dans un autre article et dont nous n'avons point à nous occuper. Mais il en est d'autres qui n'ont qu'un rôle passif et auxquelles s'appliquent plus ou moins complètement les indications que nous avons données précédemment : ce sont surtout les parties osseuses et cartilagineuses et, dans une certaine mesure, les membranes qui limitent les vaisseaux et qui constituent les parois de quelques organes creux. Encore ces dernières comprennent-elles toujours des fibres musculaires qui s'opposent à ce qu'on puisse appliquer sans restriction à ces parties membraneuses les conséquences des lois physiques et mécaniques auxquelles sont assujettis les corps solides.

Ce n'est donc, en réalité, que des parties osseuses et cartilagineuses que nous avons à nous occuper. Il importe d'ailleurs de remarquer que l'on ne peut arriver à des résultats très précis, car ces substances ne sont pas réellement homogènes et par là se distinguent des corps dont l'étude a conduit à l'obtention de lois bien déterminées.

Nous nous proposons seulement de montrer comment les indications générales que nous avons signalées trouvent leur application dans l'étude du squelette des animaux, et nous suivrons l'ordre précédemment adopté.

On a pu, comme nous l'avons dit, étudier les effets de la traction sur les os en employant des parties isolées. Mais il est très difficile de dire comment, chez les êtres vivants, les os résistent à la traction : il n'y a que peu de cas dans lesquels se manifeste exclusivement cet effet. Il se rencontre cependant pour l'avant-bras et le bras dans le cas d'un homme suspendu par les mains, ou dans le cas où un homme cherche à soulever des poids posés sur le sol.

Mais il est difficile de savoir, dans ce cas, quel est le rôle véritable des os et dans quelle mesure ils servent à transmettre l'action de la force qui est appliquée à une de leurs extrémités; car il existe des muscles insérés à ces os et qui, plus ou moins contractés, peuvent transmettre en partie, ou peut-être même en totalité, cette action. Il n'y a aucune détermination qui ait été faite, croyons-nous, qui permette de dire comment s'effectue la répartition

des efforts. Nous pensons que, dans le cas de l'homme suspendu par les mains, lorsqu'aucun muscle n'est contracté, la transmission doit se faire par les os seuls; mais il n'en est plus de même dès qu'il y a contraction des muscles, lorsque le corps commence à être soulevé.

Cette observation s'applique naturellement aux capsules fibreuses qui s'insèrent aux articulations et qui transmettraient l'action de la force de la main à l'avant-bras, de l'avant-bras au bras et de celui-ci à l'omoplate, si les muscles n'intervenaient pas pour aider à cette transmission ou même pour la réaliser en totalité.

S'il existe une traction effective sur les os, elle ne peut pas ne pas produire un allongement; mais cet allongement doit être excessivement petit et n'a jamais été observé effectivement. Ce serait d'ailleurs un allongement élastique et l'os reprendrait sa longueur lorsque la traction cesse, car on n'a jamais signalé un allongement permanent à la suite d'efforts analogues à ceux que nous indiquons.

En ce qui concerne la compression, il n'est pas douteux qu'elle se transmette par les cartilages et les os, car les parties qui entourent ceux-ci, muscles, tissu cellulaire, peau, ne sont pas rigides et ne peuvent produire cette action.

La compression se manifeste donc constamment dans le cas de l'homme debout et elle croît nécessairement depuis les vertèbres cervicales jusqu'au calcanéum qui transmet au sol l'action du poids du corps entier ; les cartilages interarticulaires concourent à cette transmission. La compression s'accroît si l'homme porte un fardeau.

Nous ferons la même remarque que pour la traction; les variations de longueur doivent être très minimes et ce sont des variations élastiques qui disparaissent quand les forces cessent d'agir.

Il est vrai qu'on a signalé des cas dans lesquels, à la suite de marches prolongées, la taille de certains individus a diminué d'une manière appréciable; c'était même, paraît-il, un moyen employé par les conscrits, qui étaient à la limite de la taille admise, pour se rendre impropres au service : il y avait donc là un raccourcissement permanent. Mais il ne semble pas qu'il doive être considéré comme analogue à ceux qui se présentent pour les corps non organisés : ce raccourcissement proviendrait, en effet, exclusivement des cartilages et surtout des cartilages intervertébraux, et serait dû à ce que la quantité de liquide qui imbibe ceux-ci diminuerait sous l'action de la pression.

Nous avons dit que la compression s'accompagnait facilement de flexion lorsque les solides ne sont pas homogènes et lorsque leur longueur dépasse quinze à vingt fois leur diamètre; les os longs présentent ces caractères, le fémur, le tibia notamment. Cependant ces effets ne se manifestent pas d'une manière appréciable (nous parlons seulement des déformations élastiques), parce que, comme nous allons le dire, les os longs présentent une disposition qui s'oppose à la flexion.

Les os longs se trouvent assez fréquemment dans des conditions où la flexion pourrait se produire ; tel est, par exemple, le cas où l'on supporte un poids à bras tendu. On n'observe pas cependant de déformation appréciable;

ceci doit être attribué à ce que les os sont creux, la matière résistante, matière osseuse, présentant la forme générale d'un cylindre annulaire, ce qui, comme nous l'avons dit, pour une masse donnée, augmente le moment d'inertie et diminue la flèche produite par un poids donné.

Comme autre exemple d'un os qui pourrait subir une flexion, nous citerons l'omoplate à la surface de laquelle s'insèrent des muscles puissants. Mais la présence de l'épine de l'omoplate a pour effet de réduire la flexion qui se produirait sans elle, comme fait l'âme des fers à T, en même temps qu'elle augmente l'étendue des surfaces d'insertion.

Parmi les substances qui se prêtent à la flexion, nous pouvons citer les ongles qui se déforment très facilement, d'autant qu'ils ont une faible épaisseur. Il importe d'ailleurs de remarquer que l'effet dépend beaucoup de la quantité d'eau dont ces organes sont imbibés.

Les plumes des oiseaux sont constituées par une substance analogue et dont l'épaisseur est plus faible, au moins en général. Les plumes fléchissent d'une manière appréciable sous l'influence de la pression de l'air, mais non pas autant qu'on pourrait le croire, eu égard à la faible masse de la substance qui résiste à cette action, ce qui tient à la forme de cylindre creux que présentent ces plumes, condition qui a pour effet de diminuer la grandeur de la flèche.

Les côtes, par leur forme courbe, se prêtent aisément à la flexion, et sur un de ces os isolés on peut obtenir, par la seule action des mains, une déformation appréciable ; mais il ne se produit rien de semblable dans les conditions normales chez l'être vivant, et les variations de forme du thorax pendant les mouvements de la respiration sont dus à des déplacements de la totalité des côtes autour des articulations costo-vertébrales.

Il y a dans l'organisme un certain nombre de muscles qui s'insèrent obliquement sur des os longs et qui, par là, sont dans des conditions où une torsion pourrait se manifester. Mais leur action est trop faible, étant donné surtout le grand diamètre des os, pour que de semblables déformations aient pu être appréciées.

Si les déformations élastiques ou permanentes subies par les os ou les cartilages sont négligeables dans l'immense majorité des cas, les ruptures ou écrasements s'observent souvent à la suite d'accidents variés, soit que ces effets se produisent par une action continue, soit qu'ils soient la conséquence d'actions brusques, de chocs.

Quelques recherches ont été faites sur la ténacité des tissus de l'organisme ; voici l'indication des charges de rupture, en kilogrammes par millimètre carré, telles qu'elles résultent des recherches de Valentin et de Wertheim.

	Valentin.	Wertheim.		
		Valeurs limites.		Valeurs moyennes.
Muscles	0,18	0,02 à	0,07	0,038
Artères	»	0,11	0,17	0,14
Veines	0,40	0,10	0,31	0,18
Nerfs	1,45	0,59	3,53	1,35
Tendons	2,62	4,11	10,38	6,25
Os	»	3,30	15,03	7,99

Ces données n'ont naturellement que la valeur d'une indication approxi-

mative, d'une part parce que les substances étudiées ne sont pas homogènes, et, d'autre part, parce que les propriétés des tissus varient beaucoup avec toutes les conditions physiologiques, notamment avec l'âge. C'est ainsi, par exemple, que pour les muscles la charge de rupture qui a été trouvée de 0,07 pour un sujet d'un an n'était que de 0,026 pour un sujet de trente ans et de 0,017 pour un sujet de soixante-quatorze ans.

Lorsqu'un membre est soumis à une traction très énergique, comme il arrive dans certains accidents, par exemple quand un membre est pris dans un laminoir, il se produit un arrachement; cet arrachement ne correspond pas en général à une rupture de l'os, mais à un déchirement des ligaments péri- et interarticulaires.

On peut avoir une idée de la grandeur des forces capables de produire ces effets par l'exemple suivant.

Hales a trouvé que l'articulation d'un genou dépouillé des muscles et des tendons n'avait cédé qu'à un poids de 830 livres.

Dans le cas où l'ossification n'est pas complète, il peut arriver que l'arrachement sépare l'épiphyse du corps de l'os.

Le même auteur a trouvé que, sur un veau de neuf semaines, il fallait une charge de 550 livres pour produire cet effet sur la jambe. En opérant de même sur l'autre jambe après avoir dépouillé l'os de son périoste, il put obtenir le même résultat avec une charge de 119 livres seulement, ce qui met en évidence l'importance du périoste à ce point de vue.

Quoique ces valeurs soient fortes, on peut cependant les réaliser facilement par l'emploi de treuils ou de moufles : aussi faut-il opérer avec précaution lorsqu'on exerce des tractions sur un membre, dans le cas de réduction des luxations, par exemple.

Il peut se produire des ruptures, des arrachements par des actions brusques, par des chocs; mais ces cas sont rares. C'est ainsi cependant qu'on peut expliquer certaines ruptures de tendons, par exemple la rupture du tendon d'Achille à la suite d'un saut d'une certaine hauteur.

Dans l'organisme, les os et les cartilages sont à peu près seuls soumis à la compression : on n'a pas de données précises sur la valeur des forces qui pourraient en produire l'écrasement. On sait cependant que la résistance à l'écrasement est grande, car on peut porter sur la tête des poids assez considérables sans produire l'écrasement des vertèbres, dont cependant la section est faible. Les cas qu'on en a signalés se sont toujours produits à la suite de chocs, de chute et alors, comme nous l'avons indiqué, l'action dépend beaucoup de la vitesse.

Une expérience citée par Désaguliers montre que les os longs ont également une grande résistance à l'écrasement dans le sens de leur longueur : un homme était assis par terre, les pieds appuyés sur une poutre invariablement fixée sur le sol : il portait à la taille une ceinture à laquelle était attachée une corde sur laquelle deux chevaux tiraient parallèlement au sol. Dans ces conditions, l'homme résistait aux efforts de l'attelage qui, on le comprend, étaient transmis à la poutre fixe par l'intermédiaire du bassin et des os des cuisses et des jambes.

Désaguliers évalue à 1 000 livres l'effort exercé par les chevaux, de telle sorte que chaque fémur, par exemple, subissait l'action d'une force de 500 livres. La charge d'écrasement de ces os était donc supérieure à cette valeur : Désaguliers, sans en donner la raison, estime qu'elle devait atteindre une valeur quatre fois plus forte.

Il n'est pas rare qu'un os s'écrase lorsqu'il est soumis à l'action d'une pression continue assez forte, à l'action d'un poids assez considérable ; cet effet se produit quand la pression agit perpendiculairement à la longueur de l'os ; on n'a pas de donnée sur la charge de rupture dans ce cas : elle dépendrait d'ailleurs beaucoup de la forme de la section de l'os.

Il est beaucoup plus rare qu'un os long soit comprimé d'une manière continue dans le sens de sa longueur de manière à amener la rupture ; cependant ce cas se présente dans quelques formes d'accidents ; mais alors l'os ne s'écrase pas à proprement parler, il subit une rupture par flexion.

Des actions brusques, des chocs peuvent produire l'écrasement : c'est ainsi qu'on a observé des écrasements de vertèbres à la suite d'une chute sur la tête.

L'écrasement se produit en général lorsqu'un corps animé d'une certaine vitesse vient rencontrer un membre qui repose d'autre part sur un appui résistant : les os du pied peuvent être écrasés par la chute d'un corps lourd, etc.

La rupture par flexion s'observe dans le cas de fractures des côtes ; lorsque la cage thoracique subit une pression continue ou un violent choc dans la direction antéro-postérieure, cette action tend à accroître la courbure des côtes, et comme pour celles-ci la limite de ténacité est peu éloignée, la rupture se produit facilement.

C'est également par flexion que se produisent en général les fractures des os longs soumis à une pression dans la direction de leur longueur ; ils tendent en effet à s'incurver pour les raisons que nous avons indiquées plus haut, et dès que la flèche devient appréciable la rupture se produit.

On est quelquefois conduit à produire volontairement la rupture d'un os, dans le cas où il s'est produit un cal vicieux, par exemple. Les différents *ostéoclastes* qui ont été ou sont employés pour obtenir ce résultat sont basés sur la rupture par flexion, ce qui permet le plus facilement de produire cette rupture au point où elle est jugée nécessaire.

Les projectiles de guerre produisent des actions variées suivant leurs dimensions et leur vitesse ; tantôt il y a écrasement, tantôt l'action est analogue à celle d'une rupture par flexion ; tantôt enfin, quand il s'agit de petits projectiles animés d'une très grande vitesse, il se produit un effet de cisaillement et l'os traversé par la balle présente une ouverture circulaire à bords nets.

ARCHITECTURE DES MUSCLES

Par G. WEISS

Un muscle se compose de fibres musculaires juxtaposées, insérées à leurs deux extrémités et dont le raccourcissement produit la variation de forme du muscle. Les muscles de l'homme et des animaux offrent les aspects les plus variés; ils ont aussi à remplir des fonctions très différentes. C'est ainsi que nous voyons les muscles fessiers du cheval destinés à développer des efforts très considérables et avoir une masse énorme, tandis que d'autres muscles de la face de l'homme n'ont à produire aucune force et sont de dimensions extrêmement réduites. Certains muscles sont longs et minces, comme le couturier; d'autres gros et courts, comme le deltoïde ou les fessiers. Les uns sont à fibres parallèles, comme le biceps; d'autres vont en éventail, comme le trapèze ou le temporal.

Il y a lieu de se demander si la structure de ces divers muscles est rationnelle, c'est-à-dire si la disposition et la longueur de leurs fibres est celle qui convient le mieux pour l'effet qu'ils doivent produire.

Au moment où un muscle se contracte, ses différentes fibres agissent par leur élasticité et se comportent d'une façon analogue à des fils de caoutchouc qui seraient allongés et tendraient à revenir à leur position d'équilibre. La loi fondamentale qui régit l'architecture des muscles est la loi élémentaire de l'allongement à la traction.

On sait que cette loi est exprimée par la formule

$$F = ES \frac{l}{L}.$$

L étant la longueur du fil, l la quantité dont il s'allonge, S la section de ce fil, F la force exercée pour produire l'allongement, et par suite aussi la traction exercée par le fil. E est un coefficient dépendant de la nature du corps soumis à l'expérience et appelé coefficient d'élasticité.

Nous allons tirer une première conclusion de cette formule. Si nous considérons des fibres musculaires ayant même section S et même coefficient d'élasticité E, pour que ces fibres prennent la même part à la force développée par le muscle dans la constitution duquel elles entrent, elles devront produire

la même force F ; par conséquent, pour toutes $\frac{l}{L}$ devra avoir la même valeur, c'est-à-dire qu'elles devront toutes se raccourcir d'une même fraction de leur longueur.

Il s'ensuit que lorsqu'une fibre musculaire devra produire un grand déplacement, c'est-à-dire avoir un grand raccourcissement, il faudra qu'elle-même soit longue ; si elle n'a à produire qu'un faible déplacement, pour produire tout son effet elle devra être courte.

Considérons maintenant un muscle dans son ensemble. Si $\frac{l}{L}$ a la même valeur pour tous les muscles, E étant sensiblement constant, la formule fait voir que S devra être d'autant plus considérable que F sera plus grand ; c'est-à-dire qu'il faut un muscle d'autant plus gros qu'il devra développer un effort plus considérable.

Borelli avait déjà constaté la loi des longueurs et fait remarquer qu'un muscle peut soulever un poids à une hauteur d'autant plus considérable qu'il a des fibres plus longues.

Pour pouvoir faire une comparaison entre tous les muscles, il faudrait que la fraction $\frac{l}{L}$ dont ils se raccourcissent soit absolument la même pour tous ; il n'en est rien.

De plus, ce que nous avons dit suppose le coefficient E constant ; en réalité, cette constance n'existe pas, et pour une même section les divers muscles développent des efforts différents ; en effet, d'après E. Weber, un muscle de grenouille peut soulever 692 grammes par centimètre carré ; ce chiffre s'élève chez l'homme à 1 087 grammes d'après Koster, et à 1 200 d'après Marey. Suivant Strauss-Durkheim, un muscle de cerf-volant porterait jusqu'à 7000 grammes. On voit combien ces écarts sont considérables en passant d'un animal à l'autre ; aussi, dans une comparaison du genre de celle que nous faisons, faut-il ne faire entrer en ligne de compte que les muscles d'une même espèce animale. Il y a même quelques réserves à faire à ce sujet, mais enfin, pour une première approximation, nous pouvons admettre l'invariabilité du coefficient d'élasticité E et de $\frac{l}{L}$.

Si nous cherchons à vérifier ces lois sur l'homme, nous constatons que lorsqu'un muscle a à opérer un grand déplacement, il est composé de fibres longues ; le couturier en est un des meilleurs exemples. Au contraire, dans des muscles à faible excursion, tels que les fléchisseurs des doigts, le jambier antérieur, le long péronier latéral et bien d'autres, les fibres doivent être courtes. Ces muscles, s'insérant à grande distance de l'os mobile sur lequel ils doivent agir, sont alors pourvus de tendons très longs. De plus, ces muscles ont généralement à développer des efforts assez considérables ; ils devraient donc avoir une grande section transversale. Mais la place faisant défaut pour loger un muscle trop épais, c'est à l'aide d'un artifice qu'un grand nombre de fibres peuvent se ranger les unes à côté des autres pour concourir à un effort commun. Les fibres musculaires s'insèrent à la partie supérieure, sur

une longueur assez considérable CE, à un os fixe ou à une aponévrose tendineuse. Puis ces fibres vont se jeter obliquement et sensiblement parallèlement entre elles sur un tendon AB, lequel se termine sur l'os mobile en B.

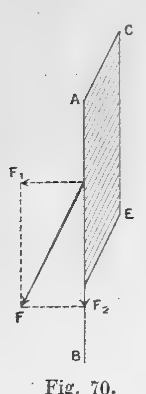
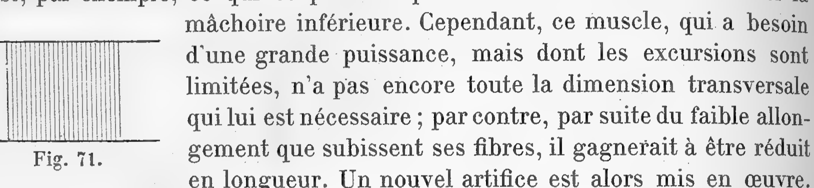


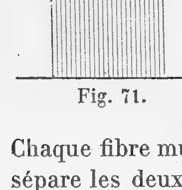
Fig. 70.

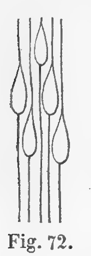
Si chaque fibre dans sa contraction produit une force f et qu'il y ait n fibres, la force totale exercée par l'ensemble des fibres est $F = nf$. Cette force n'est pas dirigée dans le sens du tendon, mais nous savons qu'elle peut se décomposer en deux autres, une force F_1 normale à la direction du tendon et qui par conséquent, n'aura aucun effet sur l'articulation, et une force F_2 à laquelle se réduira toute l'action utile du muscle.

Les fibres musculaires peuvent d'ailleurs s'insérer des deux côtés du tendon AB, ou d'un côté seulement. Suivant le cas, on a alors un muscle penniforme et semi-penniforme.

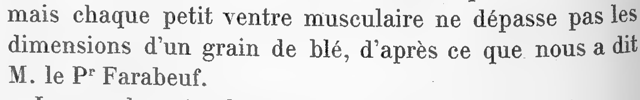


Dans le cas où les deux os à mouvoir l'un par rapport à l'autre sont voisins et où l'espace latéral ne manque pas, les fibres vont directement d'un os à l'autre, comme le représente la figure 71. C'est, par exemple, ce qui se présente pour le masséter destiné à élever la mâchoire inférieure. Cependant, ce muscle, qui a besoin d'une grande puissance, mais dont les excursions sont limitées, n'a pas encore toute la dimension transversale qui lui est nécessaire ; par contre, par suite du faible allongement que subissent ses fibres, il gagnerait à être réduit en longueur. Un nouvel artifice est alors mis en œuvre. Chaque fibre musculaire n'a que le tiers environ de la longueur totale qui sépare les deux points d'insertion ; ces fibres sont groupées en petits ventres prolongés par un tendon. Les petits muscles ainsi constitués sont juxtaposés, mais leurs ventres musculaires ne se correspondent pas à la même hauteur ; de façon à ne pas donner trop d'épaisseur au muscle total, ils se disposent à peu près comme l'indique la figure 72. Il en résulte qu'en réalité le muscle masséter a une longueur de fibres musculaires trois fois moindre que leur longueur apparente et une section efficace trois fois plus considérable.


Fig. 71.


Fig. 72.

Un autre muscle de l'économie offre cette même disposition dans de plus grandes proportions. C'est l'ischio-coccygien. Le coccyx n'ayant qu'une mobilité insignifiante, la longueur des fibres de ce muscle doit se réduire beaucoup ; aussi offre-t-il la même structure que le masséter, mais chaque petit ventre musculaire ne dépasse pas les dimensions d'un grain de blé, d'après ce que nous a dit M. le Pr Farabeuf.



Le grand pectoral nous offre aussi une disposition remarquable, ayant pour but de conserver à chacune des fibres qui le constituent un même allongement relatif. Ces fibres s'insèrent d'un côté à la clavicule et au sternum, de l'autre à l'humérus. Dans leur trajet, ces fibres se croisent, comme l'indique la figure ci-contre. Il est aisé de voir que sans cette disposition, au moment

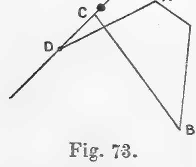


Fig. 73.

des mouvements de l'humérus, les fibres AC ne subiraient qu'une variation de longueur insignifiante, tandis que les fibres inférieures seraient considérablement étirées. Ici encore, l'architecture du muscle est rationnelle.

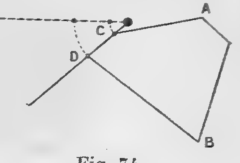


Fig. 74.

En étudiant les muscles des divers animaux, nous trouvons à chaque pas, des faits montrant la relation qui existe entre la structure de l'organe et sa fonction. C'est ainsi que nous voyons des muscles de la cuisse prendre un développement énorme chez les animaux sauteurs, chez le kanguroo en particulier. Chez les oiseaux, ce sont les muscles pectoraux destinés au vol qui attireront surtout notre attention, et il en ressortira un grand enseignement si nous comparons entre eux les muscles de diverses espèces. Certains oiseaux ont l'aile très grande, ils ne font que des battements de faible amplitude, par suite de la résistance considérable que l'air oppose à la surface de ces ailes. D'autres oiseaux ont des ailes petites et sont, pour pouvoir s'élever, obligés de faire des mouvements très étendus afin de compenser la petite surface sur laquelle ils prennent leur point d'appui. Dans la première catégorie rentrent les oiseaux de grand vol, l'aigle et la frégate; comme on peut le prévoir d'après ce que nous savons déjà, ces oiseaux ont des pectoraux courts mais très gros; les seconds, comme le guillemot et le pingouin, ont des pectoraux longs et grêles. Des faits analogues se retrouvent chez les mammifères; ils sont particulièrement démonstratifs sur les muscles fléchisseurs de la jambe sur la cuisse. Le biceps fémoral, le droit interne et le demi-tendineux ont chez les divers mammifères un point d'attache très variable. Chez l'homme, ces muscles s'insèrent très près de l'articulation du genou; par conséquent l'amplitude de leur déplacement sera très petite et ces muscles auront des fibres musculaires courtes,

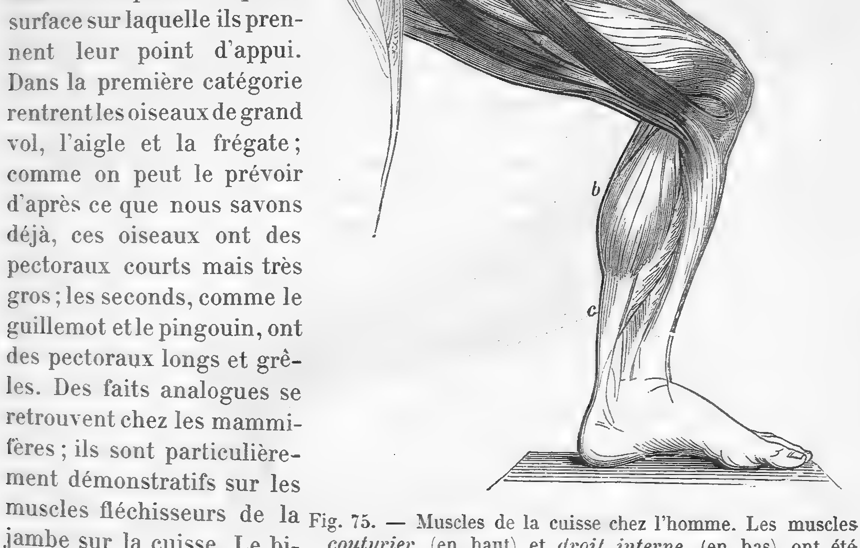


Fig. 75. — Muscles de la cuisse chez l'homme. Les muscles *couturier* (en haut) et *droit interne* (en bas) ont été fortement ombrés pour qu'on pût facilement les reconnaître. — Le droit interne est à son extrémité inférieure, pourvu d'un long tendon; sa partie charnue est courte, ce qui est en harmonie avec l'étendue bornée du mouvement de ce muscle dont l'attache est très rapprochée du genou. — Muscle couturier pourvu d'un court tendon à son attache inférieure.



Fig. 76. — Muscle de la cuisse chez le Magot, muscle droit interne presque entièrement formé de fibres rouges; les attaches de ce muscle assez éloignées du genou, lui donnent une grande étendue de mouvement comme fléchisseur de la jambe sur la cuisse. — Muscle couturier très peu pourvu de tendon.

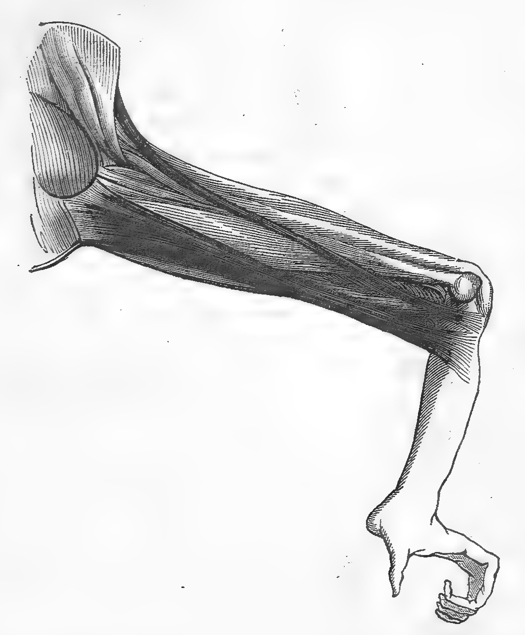


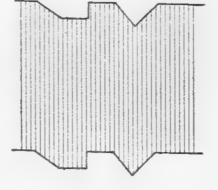
Fig. 77. — Muscle de la cuisse chez le Coaïta. — Droit interne, s'insérant loin du genou, presque entièrement dépourvu de tendon. — Le couturier ayant son attache supérieure très éloignée de l'articulation coxa fémorale, a des mouvements très étendus; il possède en conséquence une grande longueur de fibre rouge et pas de tendon.

prolongées par un tendon assez long. Chez les singes, ces mêmes muscles s'insèrent plus ou moins bas, et à mesure que l'on voit cette insertion s'éloigner du genou, la fibre musculaire augmente de longueur aux dépens du tendon, puisque l'excursion du point d'insertion inférieure devient de plus en plus considérable. Chez les quadrupèdes, où le biceps s'insère sur presque toute la longueur du péroné, le tendon a complètement disparu.

Il serait important de comparer sur un même individu, sur l'homme en particulier, les divers muscles de l'organisme et de vérifier que chacun d'eux a une longueur de fibre bien adaptée à sa fonction. Malheureusement, cette comparaison est impossible, les divers muscles n'ayant pas le même coefficient de rétractilité, ainsi que je l'ai déjà dit. Les chiffres les plus divers ont été donnés à cet égard; il est possible que certains muscles ne se raccourcissent que de 25 p. 100 de leur longueur, tandis que pour d'autres ce coefficient monterait à 60 p. 100.

On a cherché, en étudiant l'architecture des muscles, à vérifier si chacun d'entre eux considéré isolément a une structure bien conforme aux lois de l'élasticité.

W. Roux a fait des observations très intéressantes sur les muscles à fibres parallèles. Ces muscles doivent avoir des fibres toutes égales entre elles, car elles ont toutes les mêmes variations de longueur au moment de la contraction, et on peut admettre qu'elles ont la même constitution. Or, Roux a fait remarquer que la ligne qui sépare les fibres musculaires des fibres tendineuses n'est pas droite, mais présente une série de sinuosités, et que ces sinuosités se reproduisent si exactement aux deux extrémités des fibres musculaires, que ces fibres ont la même longueur dans toute la largeur du muscle.


Fig. 78.

J'ai moi-même cherché à vérifier que les muscles à fibres non parallèles avaient aussi, en tous leurs points, une longueur de fibre rationnelle. Cette recherche m'a paru nécessaire, car, d'après Haughton, ces muscles auraient une architecture si mal comprise que, dans leur contraction, ils travailleraient de la façon la plus défectueuse. Ce fait aurait été en opposition absolue avec le principe de l'adaptation fonctionnelle. Un muscle à fibres non parallèles ne doit plus avoir de fibres égales entre elles. Considérons un cas simple, celui d'un muscle triangulaire, c'est-à-dire d'un muscle dont toutes les fibres issues d'un même point C vont s'insérer sur une longueur AB. Lorsque ce muscle se contracte, le point C se déplace sur la ligne CD et les diverses fibres ne se raccourcissent plus de la même quantité. C'est la fibre CD qui subit le plus grand raccourcissement, et les fibres extrêmes CA et CB le moindre; donc, la fibre CD doit être la plus longue et les fibres extrêmes les plus courtes. En étudiant la question avec soin, on trouve que la longueur des fibres musculaires doit être limitée par un cercle décrit sur DC comme diamètre; la partie

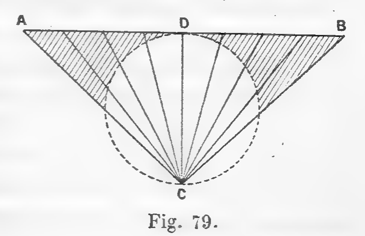


Fig. 79.

extérieure du cercle et couverte de hachures doit être du tendon. Il est bien évident que si, comme cela arrive le plus souvent, il y a un tendon en C, il faut prolonger d'autant chaque fibre musculaire du côté opposé. Il est impossible de trouver des muscles triangulaires sur lesquels on puisse vérifier cette structure, mais on peut y arriver sur des muscles penniformes qui ont aussi des fibres non parallèles entre elles. Si l'on transportait toutes ces fibres parallèlement à elles-mêmes, de façon à réduire leur insertion inférieure à un point, on aurait un muscle triangulaire qui devrait suivre la loi que nous venons d'indiquer.

Sur certains muscles, j'ai obtenu des vérifications remarquables, mais j'ai trouvé une exception que je n'ai pu expliquer. Le brachial antérieur du singe offre aussi un exemple des plus démonstratifs de l'adaptation fonctionnelle. Ce muscle a des fibres presque parallèles entre elles, mais elles ne se raccourcissent pas toutes de la même quantité par la contraction. Au moment de la flexion du bras, les fibres AC, les plus éloignées du coude, subissent la plus grande variation de longueur ; les fibres les plus rapprochées, BD, ont la plus petite excursion. De même, les fibres AC sont les plus longues et BD les plus courtes. Mais si l'on cherche quelle doit être la longueur relative exacte de ces diverses fibres pour les déplacements qu'elles ont, on trouve que les plus rapprochées seraient trop longues si elles prenaient tout l'espace BD. Aussi l'on voit apparaître une portion endineuse, ombrée sur la figure, qui régularise le muscle. Dans des mesurest que j'ai faites, j'ai trouvé que la fibre située suivant BD avait 40 millimètres, valeur dont le chiffre théorique ne s'écartait que de 2 millimètres.

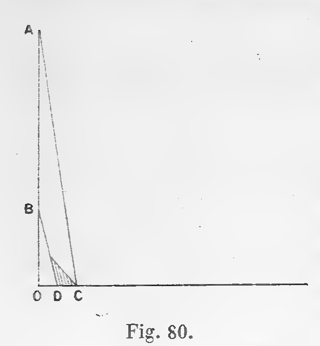


Fig. 80.

Il y a lieu de se demander si la longueur des différentes fibres d'un muscle est acquise par hérédité, ou si elle est réellement subordonnée à la fonction de ce muscle.

Divers auteurs, Fick, Gubler, Henke, Hueter, s'étaient déjà occupés de la relation qui existe entre la longueur des muscles et leur fonction, mais sans comprendre nettement le rôle de l'adaptation fonctionnelle. C'est la pathologie qui fit entrer la question dans une voie nouvelle, à propos de la difformité connue sous le nom de pied bot. Le pied bot est toujours accompagné d'altérations du côté des muscles du mollet, et certains chirurgiens, parmi lesquels Jules Guérin, soutenaient que c'était là la lésion primitive, produisant, ultérieurement, la luxation du pied. D'autres pensaient avec Scarpa que la luxation était le phénomène primitif. M. Marey, en discutant des faits observés, montra qu'une transformation partielle de la fibre musculaire en tendon est toujours la conséquence d'une diminution d'amplitude des mouvements, que cette diminution vienne d'un accident, comme le pied bot, ou de l'âge.

W. Roux apporta un grand nombre d'observations anatomiques à l'appui de l'adaptation fonctionnelle des muscles.

En premier lieu, il fit remarquer que, si la longueur des fibres musculaires

était sous la dépendance d'une influence héréditaire, il fallait s'attendre à trouver de nombreuses contradictions dans l'étude des anomalies musculaires. Il réunit un grand nombre de ces anomalies et constata qu'elles suivaient les mêmes lois que les muscles réguliers.

En effet :

1° Les faisceaux musculaires d'un muscle anormal, pour lequel tous les déplacements sont égaux, sont eux-mêmes égaux;

2° Si des faisceaux musculaires d'un muscle anormal s'insèrent à des tendons de mouvements divers, ces faisceaux ont des longueurs différentes, et les plus longs correspondent aux mouvements les plus étendus.

Ces règles s'appliquent aussi aux faisceaux aberrants d'un muscle normal, ou à un chef accessoire.

Il résulte de ces faits la possibilité de rejeter l'influence de l'hérédité; Roux se proposa de vérifier directement que pendant le cours de la vie même, l'adaptation fonctionnelle peut produire ses effets. Il fallait pour cela faire des mensurations très soignées sur un muscle susceptible de présenter de grandes variations dans l'amplitude de ses mouvements d'un individu à un autre. Il fallait, de plus, que ce muscle fût à fibres parallèles prolongées par une portion tendineuse, afin de pouvoir faire la part de chacun de ces éléments. Le carré pronateur convient parfaitement à ces recherches, car il a une structure convenable et l'amplitude de rotation du radius autour du cubitus peut offrir de grands écarts suivant les individus. En effet, les affections articulaires du bras peuvent diminuer beaucoup les mouvements de pronation et de supination; au contraire, certains exercices, comme la gymnastique ou l'escrime, leur donnent généralement une plus grande amplitude. Roux fit ses mesures sur 51 bras et en tira des conclusions absolument probantes.

La dissection des muscles du dos de deux individus atteints de cyphose lui permit aussi de constater que dans les régions où la mobilité était devenue moins grande, les muscles s'étaient partiellement transformés en tendons Dans l'un des cas, la cyphose datant de l'enfance, la transformation était parfaite, les tendons des muscles modifiés ne se distinguaient des autres tendons que par leur plus grande longueur; dans un cas où la cyphose était de date plus récente, la partie ancienne du tendon était blanche et semblable aux tendons normaux, mais entre elle et le muscle on voyait une portion tendineuse grise, c'était la partie où le muscle avait fait place au tendon, comme on pouvait s'en convaincre par les vestiges que le microscope permettait d'y découvrir encore. L'adaptation fonctionnelle était prise là sur le fait, en pleine activité.

Enfin, M. Marey apporta une dernière preuve expérimentale et parfaitement démonstrative. Le mollet du nègre est absolument différent du mollet du blanc. Alors que ce dernier a un gastrocnémien gros, à fibres musculaires courtes et prolongées par un long tendon d'Achille, le nègre a un muscle beaucoup plus grêle, mais à fibres musculaires plus longues. C'est-à-dire que le mollet du blanc est capable d'un grand effort, mais avec petit déplacement, tandis que chez le nègre ce même muscle a une plus grande excursion, mais n'est susceptible de produire qu'une moindre force.

Comme dans les deux cas le muscle doit pouvoir produire le même effet,

c'est-à-dire soulever le corps sur la pointe des pieds, il agit certainement chez le nègre sur un plus grand bras de levier que chez le blanc. L'expérience vérifie ces prévisions ; en mesurant la saillie que le calcanéum fait en arrière de son axe de rotation chez le nègre et chez le blanc, on trouve que ces deux nombres sont dans le rapport de 7 à 5. Si l'on pouvait raccourcir le calcanéum du nègre, l'adaptation fonctionnelle entraînerait la transformation du gastrocnémien. Cette expérience peut se faire sur le lapin, dont le calcanéum est très saillant. En le diminuant par résection et laissant vivre l'animal pendant une année, on trouve, au bout de ce temps, qu'il s'est produit une modification profonde dans son gastrocnémien. La partie musculaire s'est raccourcie et épaissie, on a transformé un mollet de blanc en mollet de nègre.

PRINCIPES GÉNÉRAUX
DE MÉTHODE GRAPHIQUE

Par G. WEISS

Lorsqu'on se propose de déterminer la loi d'un phénomène, le résultat des expériences auxquelles on se livre consiste généralement en une série de chiffres que l'on réunit en un tableau. Par exemple, pour l'étude de la compressibilité des gaz, on fera un certain nombre d'expériences dans lesquelles on mesurera la pression et le volume d'une masse de gaz. Le tableau sur lequel on aura consigné ces mesures permettra de retrouver, par une simple lecture, de connaître, dans la suite, quel est le volume correspondant à une pression déterminée, si la valeur de cette pression figure sur le tableau. Si cette pression ne se trouve pas parmi celles que l'on a mesurées, mais tombe entre deux valeurs du tableau, il faudra, pour obtenir le volume correspondant, se livrer à une opération de calcul dite interpolation, qui donnera au moins approximativement le résultat cherché. On voit que la possession du tableau donne la loi du phénomène.

Cependant, comme nous l'avons dit, certains calculs sont nécessaires dans chaque cas particulier ; de plus, la loi d'ensemble ne se présente pas facilement à l'esprit.

Deux méthodes permettent d'obtenir d'une façon beaucoup plus parfaite la loi générale des phénomènes et une valeur particulière déterminée.

La première consiste à établir une formule à l'aide des résultats trouvés. Cette méthode, souvent précieuse, n'est guère employée dans les sciences biologiques ; elle exige d'ailleurs des connaissances mathématiques trop spéciales pour rentrer dans le cadre de cet ouvrage ; nous nous contenterons de la signaler.

Représentation des résultats par les courbes. — La deuxième méthode consiste à représenter le phénomène par une courbe. Supposons qu'à l'aide d'une série d'expériences sur la compressibilité des gaz, nous ayons obtenu le tableau dont j'ai parlé plus haut : comment allons-nous établir ce que l'on appelle la courbe du phénomène ? Prenons deux lignes droites se coupant à angle droit, ox et oy, la première dite axe des abscisses, la seconde axe des ordonnées. Sur l'axe des abscisses, nous porterons diverses longueurs proportionnelles aux pressions figurant dans notre tableau. Par

exemple, si nous avons, dans nos expériences, employé des pressions croissant régulièrement de 1 atmosphère, en commençant par la pression atmosphérique, nous portons sur la ligne des abscisses des longueurs *oa*, *ob*, *oc*, etc., variant suivant la même loi; les points *o*, *a*, *b*, *c*, seront ainsi équidistants. Puis, au point *a*, correspondant à la pression de 1 atmosphère, nous mènerons une parallèle à l'axe *oy*, de longueur *aa'*, représentant, à une certaine échelle, le volume du gaz. En *b*, nous mènerons une seconde parallèle à *oy* et nous lui donnerons une longueur *bb'*, proportionnelle au volume du gaz à cette pression. Si, à 2 atmosphères, le volume du gaz s'est réduit à la moitié, *bb'* sera la moitié de *aa'*, ainsi de suite pour les ordonnées en *c*, *d*, *e*, etc. Nous obtiendrons une série de points qui se trouveront sur une courbe *a'b'c'*..., qu'il est aisé de tracer d'une façon continue.

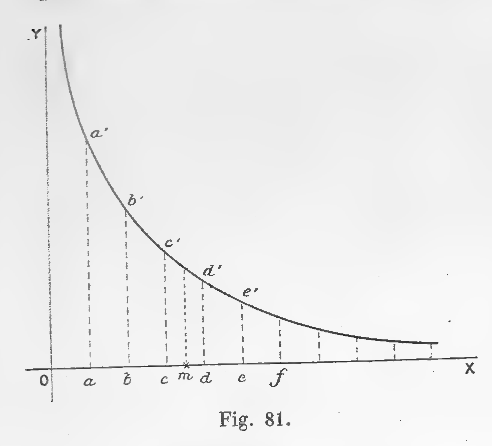


Fig. 81.

Cette courbe nous donnera évidemment tous les renseignements contenus dans le tableau. Supposons que l'on désire avoir le volume du gaz à la pression *p*, chiffre contenu dans le tableau, il suffira de chercher sur la courbe l'abscisse correspondante, et de mesurer l'ordonnée de la courbe. Cette ordonnée, comparée à *aa'*, donnera la réduction de volume effectuée par la pression. En général, pour faciliter les lectures, on trace les courbes de ce genre sur des papiers quadrillés en millimètres, par exemple; il est alors facile de lire la valeur des abscisses et des ordonnées. On conçoit qu'à l'aide de cette courbe, il est aussi facile d'avoir le volume de gaz correspondant à une pression quelconque, que cette pression fasse partie du tableau ou non. Dans le cas où ce n'est pas une des valeurs mesurées, l'abscisse ne tombe pas sur un des points marqués *a*, *b*, *c*, etc.; elle viendra, par exemple, en *m*, entre *c* et *d*. Comme précédemment, on mesurera l'ordonnée correspondante et on déduira le volume.

Il suffira de comparer quelques tableaux avec les courbes correspondantes pour se rendre compte de la facilité avec laquelle ces derniers donnent la loi d'un phénomène, loi qui échapperait complètement parfois sans ce procédé de représentation.

Pour tirer tout le profit possible des courbes représentatives d'un phénomène, il faut avoir quelque pratique de la lecture de ces documents et posséder quelques notions faciles à acquérir en choisissant des exemples convenables.

Prenons d'abord le cas de ce que l'on appelle une loi linéaire.

Comme exemple, cherchons à représenter, par une courbe, un mouvement uniforme. Nous savons que, dans le mouvement uniforme, en des temps égaux,

les espaces parcourus sont égaux; pour fixer les idées dans le cas qui nous occupe, dans chaque seconde le mobile parcourra 1 mètre. Pour représenter ce mouvement, portons sur l'axe des abscisses les longueurs égales représentant les secondes. Puis, aux points obtenus, menons des ordonnées dont la longueur figurera l'espace parcouru; ces ordonnées successives auront 1 unité, 2 unités, etc.

Les divers points ainsi obtenus seront sur une ligne droite OA. C'est pour cette raison que la loi de progression du mobile est dite linéaire. Il est facile, sur cette courbe, de trouver immédiatement la vitesse du mobile; elle est, en effet, représentée par l'espace parcouru au bout d'une seconde, c'est-à-dire par la différence entre deux ordonnées quelconques, distantes de l'abscisse représentant une seconde, ou encore par l'ordonnée correspondante à la division 1. Sur la droite OA, on voit ainsi que la vitesse est de 1 mètre par seconde. Si l'on voulait représenter cette vitesse par une courbe, comme elle est constante, la courbe serait une droite A′, parallèle à OX. Nous savons maintenant que toutes les fois où l'on aura une droite passant par l'origine comme représentation d'un mouvement, ce mouvement sera uniforme et la vitesse sera représentée par la droite parallèle à OX, passant par le point correspondant à l'abscisse 1. Ainsi la droite OB représente un mouvement uniforme dont la vitesse est donnée par B′. Cette vitesse est triple de la vitesse A′.

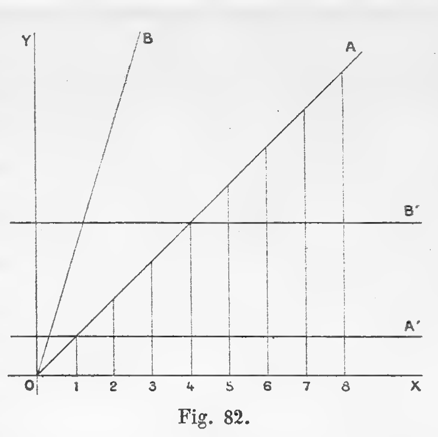


Fig. 82.

On voit que plus la droite est inclinée sur OX, plus la vitesse est grande.

Il peut arriver que la droite représentative d'un mouvement uniforme ne passe plus par l'origine. Tel est le cas de la droite A_1A. Cela veut dire qu'au moment où l'on a commencé les observations, le corps avait déjà franchi un espace OA_1. OA_1 est ce que l'on appelle l'ordonnée à l'origine; elle représente la grandeur du phénomène au commencement de l'observation. Il suffit, pour être ramené au cas précédent, de mener par A_1 une parallèle A_1X' à OX. Les ordonnées, prises par rapport à ce nouvel axe des abscisses, représentent le chemin parcouru depuis le commencement de l'observation.

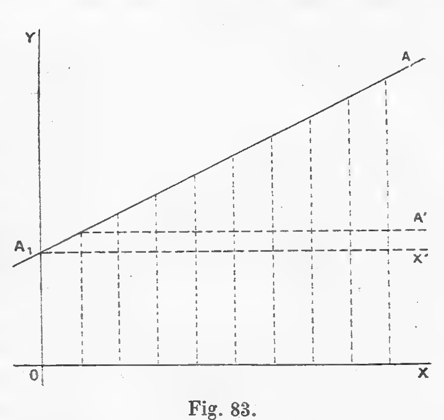


Fig. 83.

La ligne A′, parallèle à X′, figurera, par rapport à X′, la vitesse du mobile. Dans le cas particulier de la figure, on voit que cette vitesse sera de un demi-mètre par seconde.

Il est bien évident qu'au lieu de chercher à représenter par une courbe la loi d'une variation de longueur, nous aurions pu prendre toute autre grandeur. Par exemple, en figurant 1 kilogramme par la longueur qui équivalait précédemment à 1 mètre, nous aurions une courbe de variation de poids ; la ligne A′ donnerait la variation de poids par seconde.

De même, on pourrait représenter un phénomène quelconque dépendant d'une variable ; chaque fois que l'on aurait comme courbe une droite, le phénomène suivrait ce que l'on appelle la loi linéaire ; les deux grandeurs étudiées varient alors proportionnellement l'une à l'autre.

Par exemple, chauffons un gaz sous volume constant et mesurons à chaque instant sa pression, puis portons en abscisses les températures à partir de 0° C., en ordonnées les pressions, nous aurons une courbe analogue à celle de la figure 84 ; A_1A est une droite. Pour avoir la pression correspondante à une température quelconque t, il faut mesurer Tt. TT_1 représente l'augmentation de pression depuis 0° C. Puisque A_1A est une droite, on en conclut que, pour une même augmentation de température, on a toujours une même augmentation de pression, quelle que soit la température prise pour point de départ. Si on passe de 0° à 1°, l'augmentation de pression est la même que si on passe de $t°$ à $(t + 1°)$, quel que soit t.

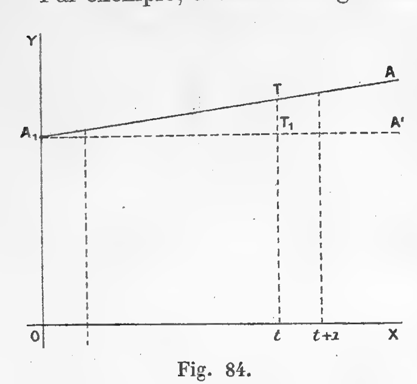


Fig. 84.

Cas d'une loi non linéaire. — Considérons un mobile animé d'un mouvement non uniforme et traçons une courbe représentative des espaces parcourus dans le temps en portant, comme précédemment, le temps en abscisses et les espaces parcourus en ordonnées. Nous aurons la courbe ci-contre, à l'aide de laquelle il sera aisé, à chaque instant, de connaître la position du mobile sur sa trajectoire. Cette courbe nous donnera encore d'autres renseignements ; nous pourrons, en effet, nous rendre compte à chaque instant de la vitesse du mobile. Considérons en particulier le point A ; quelle est, à ce moment, la vitesse cherchée ? Nous savons que cette vitesse est celle que prendrait le projectile si, à partir du moment considéré, il continuait son chemin en ligne droite d'un mouvement uniforme. Nous savons que, dans ce cas de vitesse uniforme, la courbe représentative devient une droite. Cette droite est évidemment le prolongement de l'élément de courbe sur lequel

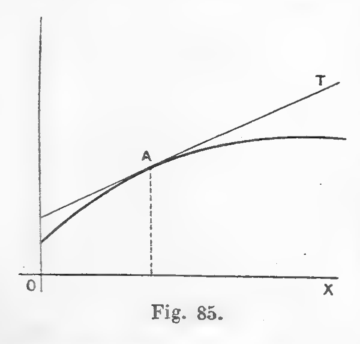


Fig. 85.

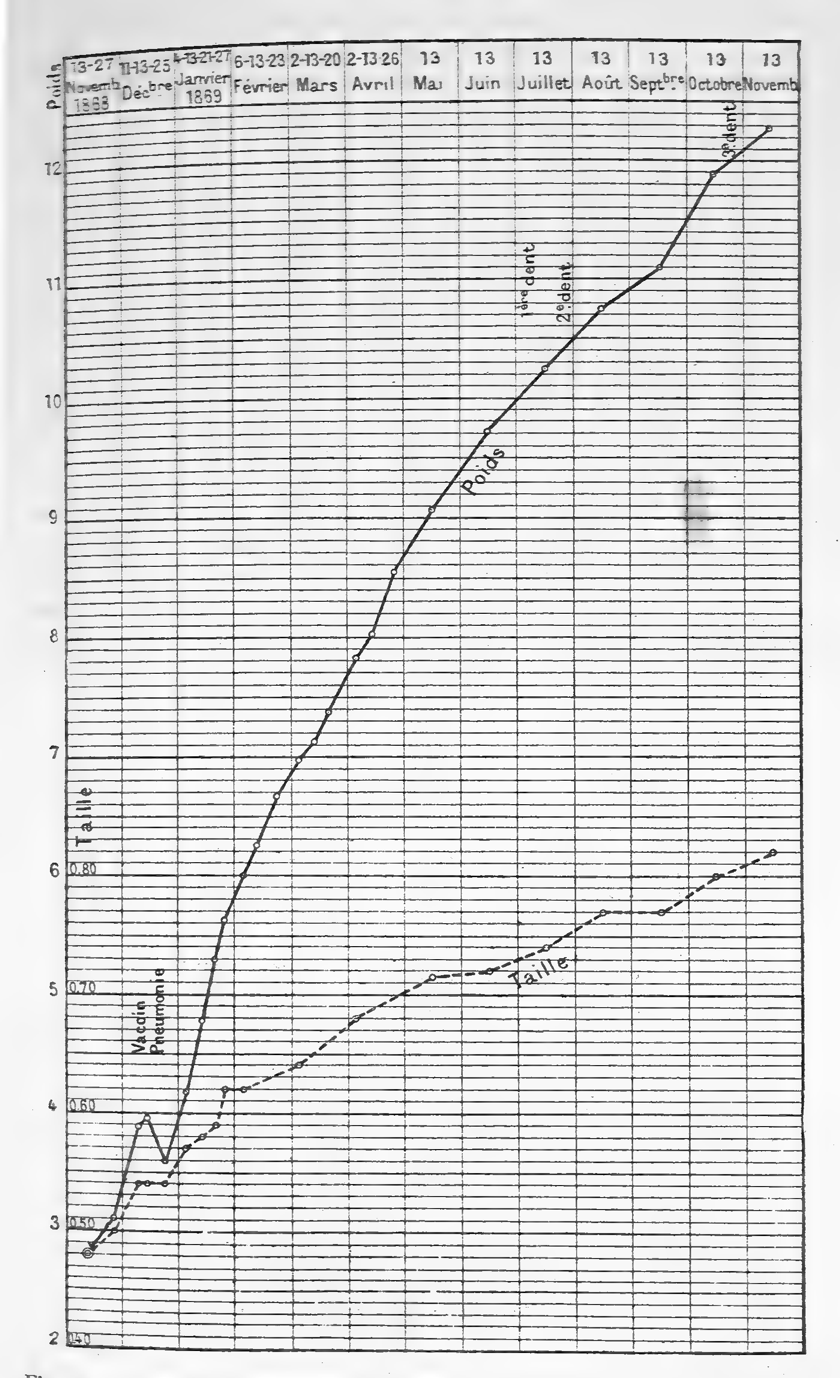


Fig. 86. — Courbes de l'accroissement du poids et de la taille de Jean Lorain pendant la première année.

se meut le projectile au moment où le mouvement devient uniforme, c'est-à-dire que c'est la tangente à la courbe au point A. Donc, pour avoir la vitesse du projectile en un point quelconque de la courbe, il suffit de mener la tangente en ce point et de chercher la vitesse du mouvement que la droite ainsi obtenue représente. Or, d'après ce qui précède, on sait trouver cette vitesse.

Dans la représentation d'un phénomène quelconque, la simple inspection de la courbe donne des renseignements importants, qu'il est parfois difficile et toujours laborieux de tirer d'un simple tableau de chiffres.

Considérons, par exemple, la courbe représentative de la variation de poids ou de taille d'un enfant (fig. 86). Non seulement une pareille courbe mettra en évidence les accidents graves qui se produisent pendant la croissance, comme celui qui est représenté sur la figure au début de la courbe, mais encore on constatera de nombreuses variations dans la vitesse d'accroissement de la taille et du poids. Tantôt la courbe a une ascension rapide : l'enfant prospère ; tantôt elle s'incline davantage sur l'axe des abscisses, ce qui correspond à une moindre vitesse d'accroissement. Il suffit, pour suivre ces diverses phases, de considérer l'inclinaison de la tangente aux points correspondants de la courbe. L'habitude permet de juger rapidement, d'après une courbe, comment se comporte approximativement le phénomène qu'elle représente, et il n'est nécessaire de faire des constructions complémentaires que lorsqu'on veut en faire une analyse très soignée.

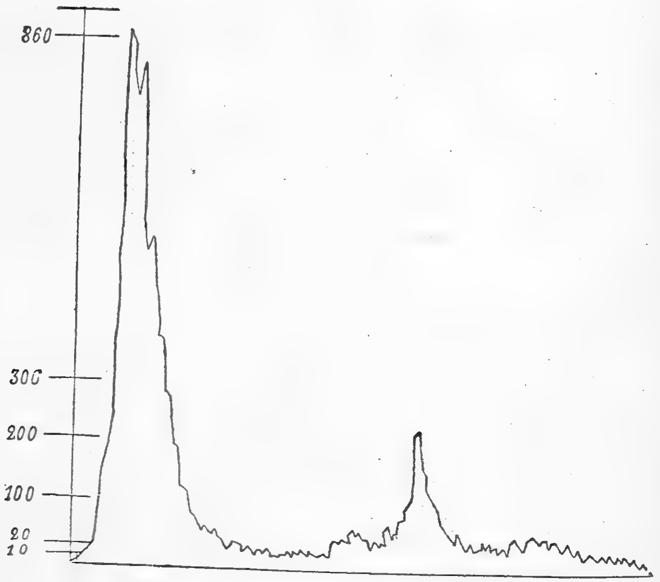


Fig. 87. — Statistique du choléra en 1832.

Par exemple, en considérant la figure 87, représentant la mortalité journalière par choléra en 1832, on se rend immédiatement mieux compte de la

marche de cette épidémie qu'on ne pourrait le faire par n'importe quelle description, même la plus soignée.

Les courbes 88, 89 et 90, font encore voir combien il est utile de représenter

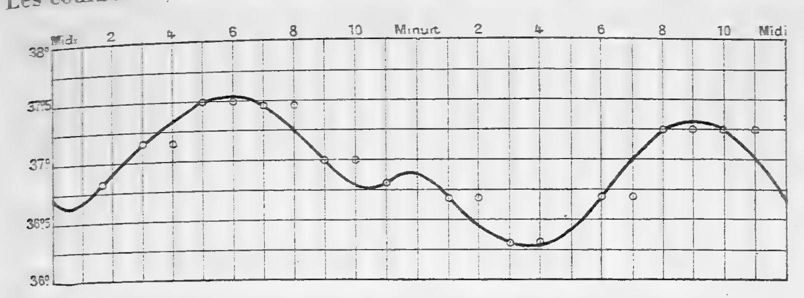


Fig. 88. — Variations horaires de la fréquence du pouls mise en courbes par le Dr Prompt, d'après les chiffres publiés par Bœrensprung.

un phénomène par des courbes pour bien l'embrasser dans son ensemble et se rendre compte de sa marche.

Il arrive qu'après avoir tracé une courbe on ait intérêt à connaître la surface comprise entre cette courbe, l'axe des abscisses et deux ordonnées.

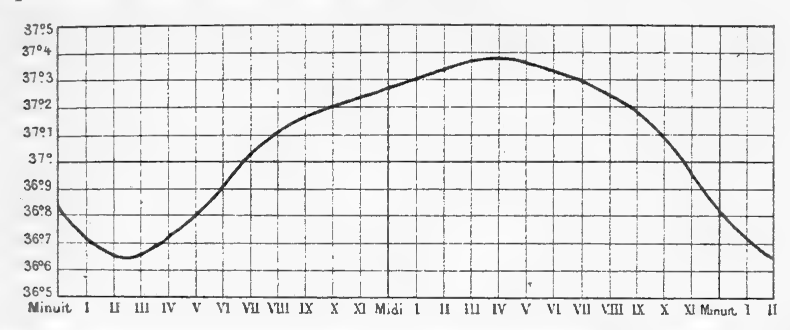


Fig. 89. — Courbes des variations horaires de la température centrale de l'homme, d'après Forel.

Par exemple, supposons qu'un corps chaud se trouve dans une atmosphère à température constante ; ce corps perdra de la chaleur et se refroidira peu à peu. On pourra tracer une courbe représentant l'excès de température du corps sur le milieu ambiant ; soit figure 91 cette courbe. Au moment où le corps a la température T_1 au-dessus de celle de l'atmosphère, on sait, d'après la loi de Newton, que la chaleur perdue par ce corps pendant le temps très court est donnée par l'expression $Q = AT_1 \times dt$ (1). dt étant le temps qui s'écoule pendant la perte de chaleur, se mesure sur l'axe des abscisses, c'est la base du petit rectangle ombré de hachures sur la figure ; T_1 est la hauteur de ce rectangle ; par conséquent, d'après la formule (1), la quantité de chaleur perdue est proportionnelle à la surface ombrée. On voit que si l'on considère à la suite les uns des autres une série de petits espaces de temps tels que dt, pour chacun d'eux la chaleur perdue sera représentée par un petit rec-

tangle tel que celui de la figure, c'est-à-dire par la surface comprise entre la

Fig. 90. — Courbes des variations de la température dans une fièvre intermittente double tierce, d'après Lorain.

courbe, l'axe des abscisses et deux ordonnées correspondant au temps pendant lequel s'est fait la perte de chaleur. Bien entendu, si, au lieu de faire l'observation pendant un espace de temps très petit, on la prolonge pendant une certaine durée, on aura à la suite les uns des autres une série de petits rectangles dont le total formera une surface analogue à celle représentée sur la figure en hachures plus espacées. On voit l'intérêt qu'il peut y avoir dans certains cas à pouvoir déterminer la valeur d'une aire. Divers procédés sont employés dans ce but. Dans certains cas rares, on peut effectuer cette déter-

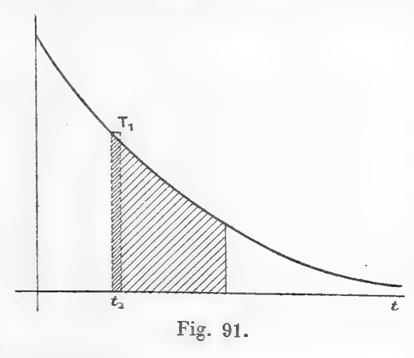


Fig. 91.

mination par le calcul. On peut aussi se servir d'appareils dits planimètres, mais ces instruments sont fort chers et ne donnent jamais une grande approximation. Les meilleurs procédés consistent à placer la courbe sur un papier très régulièrement quadrillé en carrés très petits et à compter par carrés la surface à évaluer, ou bien à se servir d'un papier très régulier comme épaisseur, à découper aux ciseaux la surface à évaluer et à la peser. On trouve dans le commerce des papiers d'étain minces qui conviennent très bien pour cette opération.

Dans les cas que nous venons de citer, le tracé des courbes se fait en déterminant un plus ou moins grand nombre de points et traçant une courbe passant sur ces divers points. Mais il est beaucoup plus avantageux, lorsque le phénomène étudié le permet, d'installer les expériences de façon que les courbes représentatives se tracent directement. C'est le but que poursuit la méthode graphique. D'ailleurs, lorsqu'il s'agit de phénomènes accomplissant leur révolution dans un très court espace de temps, il est en général impossible de déterminer plusieurs points de la courbe représentative. Dans ce cas, le tracé direct rend des services considérables.

Nous allons étudier les procédés mis en œuvre dans ce but.

CYLINDRES ENREGISTREURS

Supposons que l'on veuille tracer automatiquement la courbe représentative de la loi de la chute des corps, on pourra munir d'un crayon un corps tombant librement sous l'action de la pesanteur. Si le crayon vient appuyer sur une feuille de papier verticale, à chaque instant il marquera un point donnant la position du corps dans l'espace.

Si pendant la chute on déplace le papier de droite à gauche d'un mouvement uniforme, le crayon ne tracera pas une verticale oY, car le corps se trouvera sur des ordonnées successives; au bout de 1 seconde il sera sur Aa, au bout de 2 secondes sur Bb, de 3 secondes sur Cc, etc. En même temps il sera tombé de A en A_1, de B en B_1, de C en C_1, etc. On aura ainsi le tracé d'une courbe représentant la loi de la chute des corps analogue à celles que nous avons indiquées plus haut. Au lieu de déplacer le papier plan, il est plus simple de l'enrouler autour d'un cylindre tournant uniformément autour d'un axe vertical. Chaque génératrice du cylindre viendra ainsi se présenter successivement au crayon, et après l'opération il suffira de couper le papier et de l'étaler sur un plan pour être arrivé au même résultat que précédemment.

Fig. 92.

Le dispositif que nous venons d'indiquer rapidement est connu sous le nom de machine de Morin. Il renferme en principe toute la méthode graphique.

Il faut, lorsque l'on veut enregistrer la courbe d'un phénomène, donner à un crayon ou stylet traceur un déplacement égal ou proportionnel à chaque

instant à la grandeur du phénomène. Le papier sur lequel se fera le tracé devra se mouvoir en plan ou sur un cylindre perpendiculairement au déplacement du crayon.

Le mouvement du papier doit être uniforme. Si cela n'était pas, il faudrait

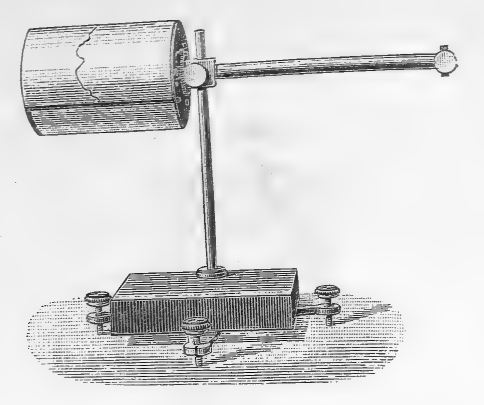


Fig. 93.

connaître exactement la loi de ce mouvement et faire sur la courbe des corrections laborieuses.

La façon d'obtenir le plus facilement le déplacement cherché est de rouler le papier sur un cylindre tournant uniformément autour de son axe. Suivant les cas, il y aura intérêt à donner à ce cylindre une rotation plus ou moins rapide. Si le phénomène à enregistrer se passe dans un espace de temps fort long, le papier devra se déplacer lentement; au contraire, son mouvement devra être d'autant plus rapide que le phénomène se produit en un temps plus court.

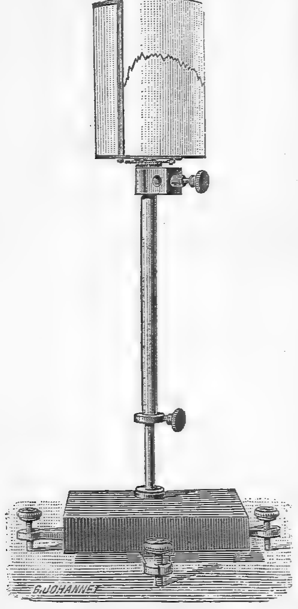


Fig. 94.

La rotation des cylindres à mouvement lent est généralement réglée par un mouvement d'horlogerie. Il y a intérêt à ce que ces cylindres puissent tourner soit autour d'un axe horizontal, soit autour d'un axe vertical; les figures 93 et 94 représentent un même cylindre susceptible de recevoir ces deux orientations grâce à une disposition du pied. Le mouvement d'horlogerie se trouve dans l'intérieur même du cylindre.

La rotation d'un cylindre à l'aide d'un mouvement d'horlogerie ne se fait pas d'une façon uniforme; il y a une légère progression à chaque oscillation de l'échappement. Par exemple, si l'échappement se fait à chaque seconde, toutes les secondes le cylindre effectue une légère rotation, puis reste au repos jusqu'à la seconde suivante

et ainsi de suite. Lorsque le cylindre tourne très lentement, chaque progression est imperceptible et pratiquement la rotation peut être considérée comme uniforme. Il n'en est plus de même lorsqu'une vitesse plus grande est nécessaire. Dans ce cas, le mouvement du cylindre est produit soit par un ressort, soit par un poids, et son uniformité est assurée à l'aide d'un régulateur.

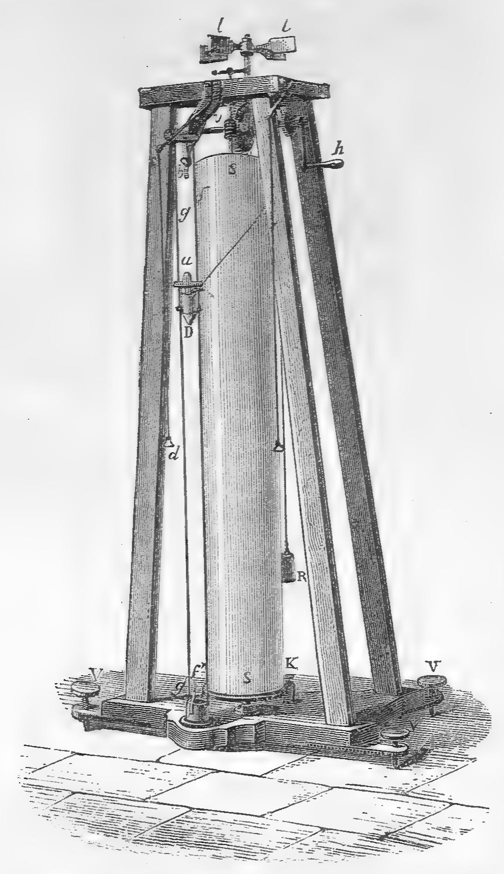


Fig. 95. — Machine Poncelet et Morin traduisant par une courbe les lois de la chute des corps.

Dans la machine de Morin, il y a un simple régulateur à ailettes et la force motrice s'obtient par un poids. Le mouvement accéléré au début devient uniforme par suite de la résistance que l'air oppose au mouvement des ailettes.

On trouve dans le commerce de petits cylindres à ressort munis d'ailettes régulatrices basées sur le même principe. En inclinant plus ou moins ces ailettes par rapport à l'axe de rotation, la résistance de l'air varie et l'on obtient des rotations plus ou moins rapides du cylindre.

Un régulateur plus parfait est celui de Foucault; les cylindres enregistreurs généralement employés dans les laboratoires français sont munis de cet appareil.

Fig. 96. — Polygraphe.

D'autres régulateurs analogues sont employés à l'étranger.

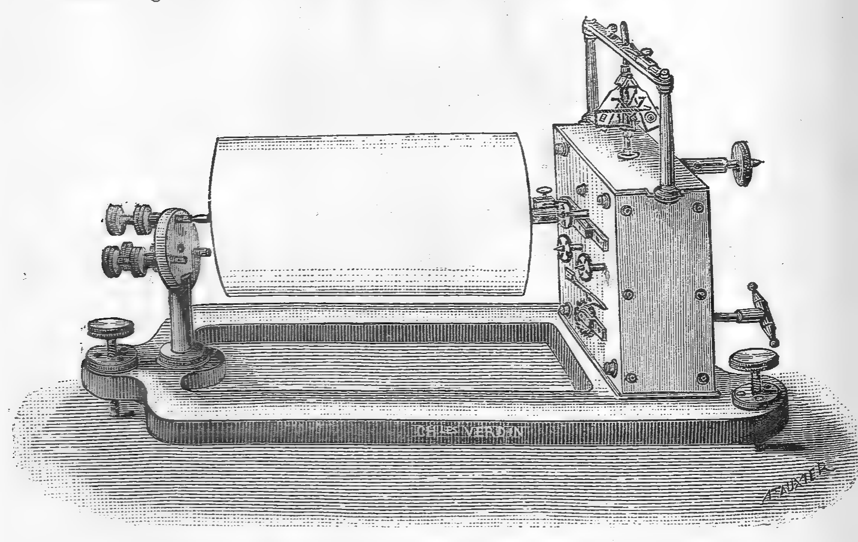


Fig. 97. — Mouvement d'horlogerie avec régulateur de Foucault.

On peut aussi se servir avantageusement des cylindres mus par l'électricité.

si le moteur est muni d'un bon régulateur, on a un mouvement très uniforme et facilement réglable.

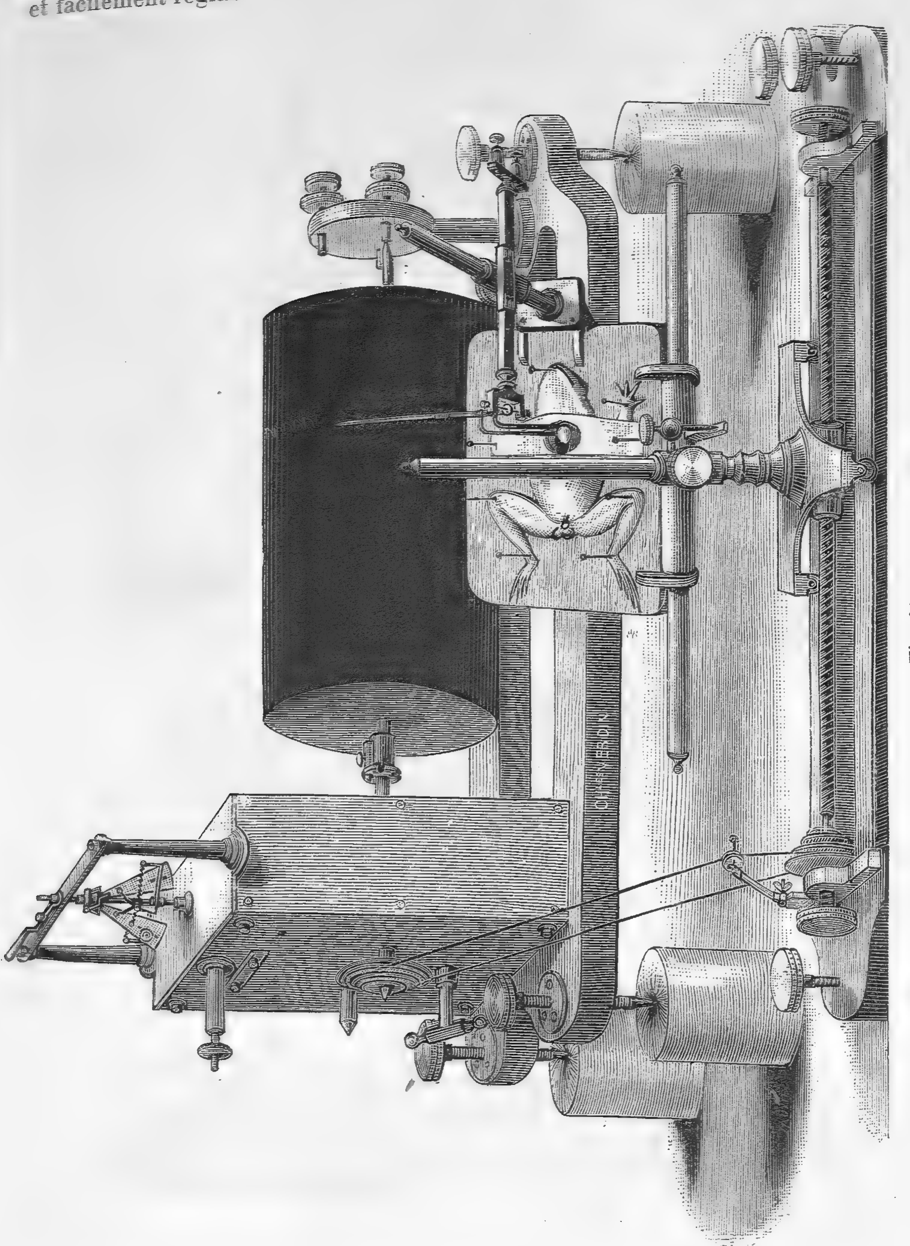


Fig. 98.

Lorsqu'on prend un tracé sur un cylindre enregistreur, après une rotation, on revient au point de départ ; il pourrait en résulter une confusion entre les différentes lignes. Un moyen d'éviter cette superposition des tracés con-

siste à monter la pointe destinée à écrire sur le papier sur un support se déplaçant parallèlement à l'axe du cylindre. Dans ces conditions, l'axe des abscisses n'est plus enroulé suivant un grand cercle du cylindre, mais décrit autour de lui une hélice. Lorsque la feuille de papier est déroulée, l'axe des ordonnées et celui des abscisses ne sont plus rigoureusement perpendiculaires entre eux, leur angle s'écarte d'autant plus de l'angle droit que le chariot portant le tracelet se déplace plus rapidement suivant l'axe du cylindre.

Fig. 99.

Dans beaucoup de cas il n'y a pas à tenir compte de cette inclinaison. Dans les expériences de quelque précision, on évite toute erreur en comptant la valeur des ordonnées parallèlement à une droite obtenue en déplaçant le tracelet à la main, le cylindre étant arrêté. Cette droite est une des génératrices du cylindre enregistreur et donne par suite la direction du déplacement que l'on enregistre.

Un autre procédé consiste à employer dans les opérations de longue durée une bande de papier de grande étendue. Cette bande de papier, au lieu

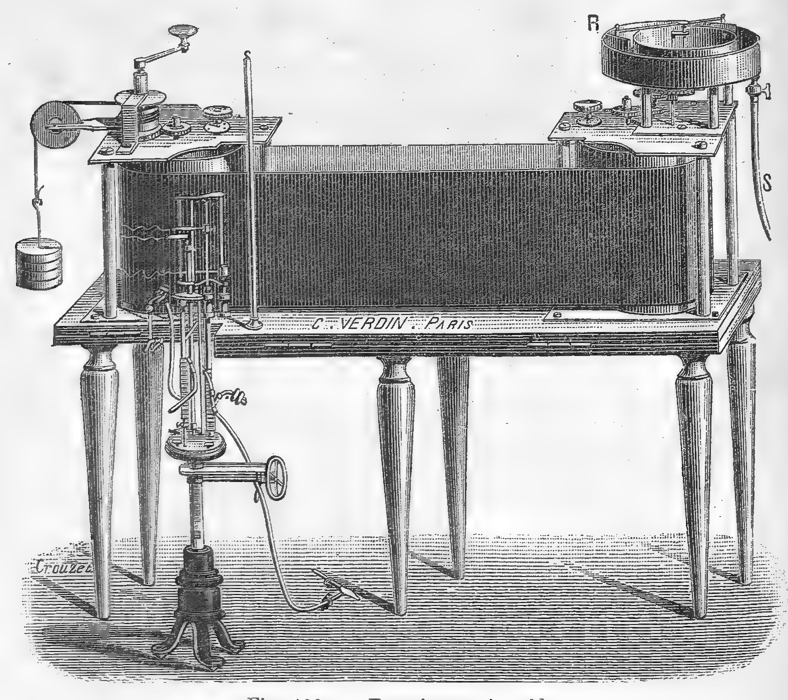


Fig. 100. — Enregistreur à poids.

d'être enroulée sur un seul cylindre, qu'il faudrait prendre de très grand diamètre, passe sur deux cylindres parallèles et éloignés l'un de l'autre. Ces appareils sont généralement mus par un poids ; l'uniformité du mouve-

ment est assurée par un régulateur à ailette tournant dans l'air ou dans un liquide.

D'autres fois, une bande de papier se déroule d'un cylindre pour aller s'enrouler sur un second, mais l'emploi de ce procédé est limité, car les tracés peuvent s'effacer lorsque les différentes spires de papier se recouvrent les unes les autres.

Il vaut mieux faire passer une bande de papier dans un simple laminoir, comme le représente la figure 101.

Il y a des cas où la surface destinée à recevoir le tracé doit être animée

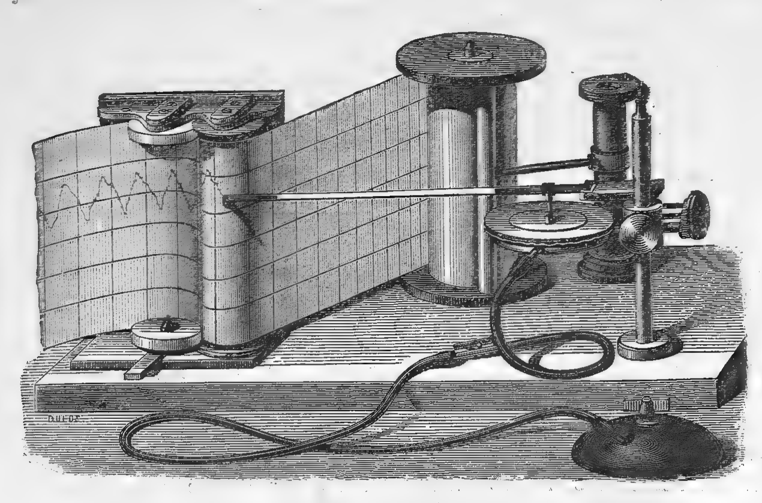


Fig. 101. — Polygraphe à bande de papier sans fin.

d'une très grande vitesse ; cela a lieu chaque fois que le phénomène à enregistrer se passe dans un espace de temps très court. On ne peut alors employer le cylindre tournant, car il y aurait fatalement des superpositions de courbes qui rendraient des tracés très difficiles à lire. Il faut alors revenir au plan se déplaçant soit en chute libre sous l'influence de la pesanteur, soit par une traction mécanique. L'expérience ne peut alors être de longue durée, ce qui n'a généralement pas d'inconvénient, puisque l'on s'adresse précisément à un phénomène s'écoulant dans un temps très court.

Dans les appareils où le phénomène à enregistrer développe une force très considérable, on peut effectuer les tracés soit à l'aide d'un crayon, soit encore mieux d'une plume. C'est le procédé qui est employé par exemple dans un grand nombre d'instruments de météorologie ou d'appareils industriels ; mais, lorsqu'il s'agit de petites forces, lorsque la moindre résistance peut altérer la forme du tracé, il faut éviter tout frottement du tracelet. C'est le cas qui se présente généralement dans les expériences de physiologie. On emploie alors un papier parfaitement glacé et recouvert d'une légère couche de noir de fumée, sur laquelle le moindre frôlement d'un levier très souple laissera une trace.

Pour enfumer le papier, on le colle d'abord avec soin sur le cylindre enregistreur, puis, animant le cylindre d'une vitesse d'environ un ou deux tours par seconde, on fait passer sur le cylindre une flamme fumeuse. Il est peu à craindre de brûler le papier, car il est appliqué sur une surface métallique qui lui enlève toute la chaleur communiquée par la flamme.

On peut enfumer à l'aide d'un petit morceau de camphre; l'opération est très rapidement faite, car le camphre, dans sa combustion, produit énormément de fumée. Mais ce dégagement est extrêmement désagréable dans les appartements et de plus la couche de noir disposée sur le cylindre n'est pas très fine, de telle sorte que, quelque parfaite que soit la pointe du tracelet, les tracés obtenus manquent de délicatesse.

On a de bons résultats à l'aide de ce que l'on appelle le rat de cave, qu'il est très aisé de se procurer chez tous les épiciers. Mais l'enfumage le plus parfait se fait à l'aide d'une petite lampe à huile analogue à celle des lanternes de voiture. En ne faisant pas la mèche trop longue, on a sur le papier glacé une couche de noir de fumée des plus fines, et l'opération peut s'exécuter sans inconvénient dans un appartement.

Une fois les tracés terminés sur le papier glacé, on le coupe suivant une génératrice du cylindre et on le fait passer dans un liquide fixateur. On obtient d'excellents fixateurs à l'aide de dissolutions de benjoin ou de gomme laque dans l'alcool. Il faut éviter de prendre les solutions trop concentrées. Le liquide se verse soit dans une cuvette à photographie, soit, mieux encore, dans une gouttière demi-cylindrique. On y passe la feuille à fixer en la tenant par les deux extrémités, puis on la fait sécher en laissant égoutter librement le liquide. Le tracé ainsi fixé se conserve indéfiniment et ne risque nullement de s'effacer.

AMPLIFICATION ET DIMINUTION DES DÉPLACEMENTS

Dans la machine de Morin, les déplacements du corps dont on voulait mesurer les mouvements s'inscrivaient en vraie grandeur sur le cylindre enregistreur. Mais il arrive souvent que les déplacements que l'on veut enregistrer aient des amplitudes trop faibles, les sinuosités de la courbe inscrite sur le papier seraient trop petites pour pouvoir être relevées et étudiées sans trop grande erreur; il faut, avant d'inscrire le phénomène, l'amplifier. Pour cela, on relie le point qui se déplace à un levier mobile en O; soit A le point d'attache. L'extrémité B du levier se déplacera sur la surface enfumée et, par suite, on aura une courbe à ordonnées d'autant plus grandes que OB est plus long et que OA est plus court, les ordonnées ont été amplifiées dans le rapport $\frac{OB}{OA}$. Ainsi, si OA a 1 centimètre et si OB en a 10, les ordonnées de la courbe seront 10 fois plus grandes que si on avait enregistré directement le déplacement du point mobile.

B A O

Fig. 102.

Il est très important de rendre ce petit levier aussi léger que possible. L'expérience et la théorie font voir qu'un levier ayant un moment d'inertie sen-

sible déforme la courbe ; il faut donc diminuer ce moment autant que le permettent les conditions de rigidité de l'appareil. Bien des instruments donnent des indications erronées par suite de l'inertie des pièces en mouvement. Ces leviers peuvent se faire à l'aide d'un brin de paille, mais on en obtient de meilleurs avec un petit fragment de bambou fendu en lame mince et amené à la lime à l'épaisseur d'une feuille de papier un peu fort. A l'extrémité, on fixe une petite lame de clinquant ou de plume d'oiseau très souple, que l'on colle au levier avec un peu de cire molle.

Il arrive aussi, qu'au lieu d'avoir à amplifier un mouvement, on ait à le réduire. C'est ce qui a lieu, par exemple, chaque fois que l'amplitude du mouvement dépasse les dimensions du cylindre enregistreur. On peut encore, dans ce cas, se servir d'un levier ; seulement, au lieu d'attacher le point mobile au voisinage de l'axe de rotation, on le fixe à l'extrémité de ce levier et le style qui se trouve au contact du cylindre se place d'autant plus près de l'axe de rotation que l'on veut réduire davantage l'amplitude du mouvement.

Un autre procédé a été indiqué par M. Marey. Prenons un fil de caoutchouc dont une extrémité est fixe et dont l'autre est reliée au point mobile dont on veut enregistrer les déplacements ; puis, fixons le style traceur en un point intermédiaire du fil de caoutchouc. Soit O le point fixe, A le point mobile, B celui qui inscrit sur le cylindre enregistreur.

Fig. 103.

Il est aisé de voir que l'excursion de B est moins grande que celle de A. Si B se trouve au milieu du fil OA, comme tout état d'allongement OA est double de OB, le déplacement du point B doit être moitié de celui de A. Si OB est le tiers de OA, B se déplace trois fois moins que A et ainsi de suite ; d'une façon générale, l'amplitude de la courbe est réduite dans le rapport de $\frac{OB}{OA}$.

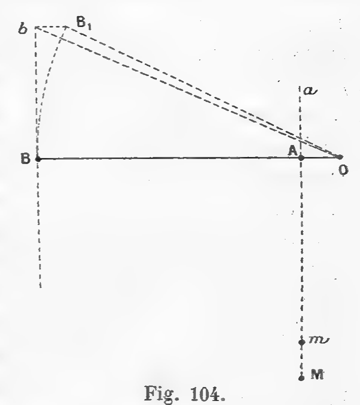


Fig. 104.

Erreurs introduites par l'arc de courbe du levier. — Lorsqu'on amplifie ou que l'on diminue le déplacement d'un point à l'aide du levier, il s'introduit une erreur du fait de l'arc décrit par l'extrémité de ce levier. Considérons un levier OB et un point mobile M relié au point A. Ce point mobile décrit une ordonnée suivant AA.

Perpendiculaire à OA, M vient en *m* ; le point A devrait venir en un point de A*a* et le point B devrait se déplacer sur B*b*. En réalité, le point B, au lieu de décrire une perpendiculaire à *o*B, décrit un arc de cercle et vient en B″, au lieu de venir en *b*. Il en résulte que la courbe enregistrée sera d'autant plus déformée que le levier sera plus court. Cette déformation est manifeste sur un grand nombre de courbes publiées ; il est aisé d'en tenir compte et de la corriger quand on connaît la longueur du levier enregistreur.

Pour cela, on prend avec un compas la longueur du levier et on décrit un arc de cercle ayant son centre sur l'arc des abscisses. Au point *o* où cet arc de cercle touche l'axe, on élève une perpendiculaire et l'on mène une série de parallèles à l'axe équidistantes. Sur chacune de ces parallèles, on reporte à partir de la courbe une série de points dont la distance horizontale à la courbe (fig. 105) soit égale à la longueur comprise entre l'arc de cercle et la perpendiculaire en *o* à l'axe des abscisses. On obtient ainsi une série de points qui,

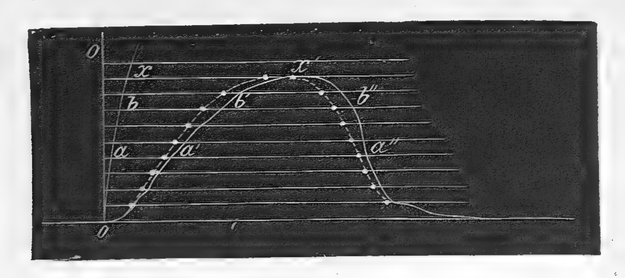


Fig. 105. — Correction de l'arc de cercle dans les tracés.

reliés les uns aux autres, donnent la courbe exacte, corrigée des erreurs introduites par l'arc de cercle décrit par le levier.

CHRONOGRAPHIE

Dans toutes les prises de tracé, il est indispensable d'indiquer à quelle durée correspond une longueur déterminée mesurée sur l'axe des abscisses. Si le cylindre employé tourne d'une façon absolument uniforme, il suffit de connaître la durée de cette rotation et la circonférence du cylindre pour pouvoir indiquer, sur l'axe des abscisses, quelle est la longueur correspondant à une seconde. Mais l'on n'est jamais certain de la parfaite uniformité de rotation du cylindre, il y a intérêt à la contrôler ; de plus, il est avantageux, pour faciliter les mesures, de diviser l'axe des abscisses en unités de temps. Suivant la rapidité du phénomène étudié et, par suite, de la rotation du cylindre, on emploiera des procédés différents.

Pour les phénomènes très lents où la division de l'axe des abscisses doit se faire en jours, heures, minutes ou même secondes, on peut se servir d'horloges ordinaires donnant cette fraction du temps.

Par exemple, supposons que l'on veuille diviser l'axe des abscisses en secondes. On établira toutes les secondes un contact à l'aide d'un pendule de longueur convenable ; ce contact commandera un signal électrique qui fera un pointage sur le cylindre tournant (fig. 106, Marey). Il est évident que le même principe s'applique au pointage des minutes ou des heures ; seulement, au lieu de produire un contact à l'aide d'un pendule, il se fera par les aiguilles d'une montre.

Un métronome analogue à celui dont se servent les musiciens peut aussi être d'un bon usage ; il suffit de disposer, sur l'instrument, des contacts de

façon à transmettre ses indications au signal électrique chargé de pointer le temps sur le cylindre.

Lorsque l'unité de temps choisie devient inférieure à une seconde, ce qui

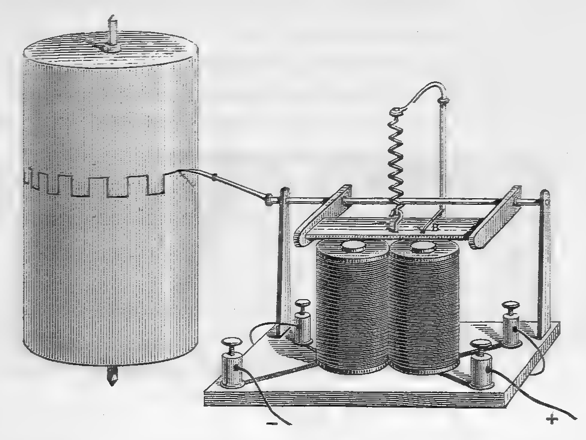


Fig. 106. — Figure théorique du signal électrique de Desprez.

a lieu souvent en physiologie, lorsque, par exemple, il faut diviser l'axe des abscisses en $\frac{1}{10}$ ou en $\frac{1}{100}$ de seconde et même parfois en fractions plus petites, il ne peut plus être question d'employer le pendule pour produire les contacts On se sert alors de diapasons. Les diapasons sont entretenus électriquement. Pour cela, entre leurs deux branches se trouve une bobine de fil conducteur contenant un fer doux et pouvant former électro-aimant. Un fil de platine vient toucher extérieurement une des branches du diapason et fermer le circuit d'une pile dont le courant peut traverser l'électro-aimant. Au moment où le courant passe, l'électro-aimant attire les deux branches du diapason et le contact avec le fil de platine extérieur est rompu; le diapason tend à revenir dans sa position, qu'il dépasse en vibrant; ce mouvement rétablit le contact et, par suite, l'attraction recommence et ainsi de suite.

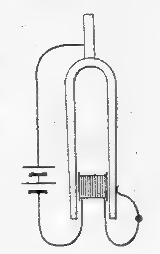


Fig. 107.

On voit qu'il se produit autant d'interruptions dans le courant que de vibrations du diapason; par conséquent, si l'on met dans le circuit de la pile un signal électrique, ce signal pourra pointer sur le cylindre enregistreur les vibrations du diapason comme il pointait les oscillations du pendule.

Pour que ce dispositif puisse fonctionner, il faut que les indications du signal électrique destiné à pointer sur le cylindre enregistreur soient très rapides.

On pourrait, il est vrai, et dans certains cas on le fait, munir directement l'extrémité du diapason d'un petit stylet très souple et l'approcher du cylindre de façon qu'il y trace directement ses oscillations; mais souvent les abords du cylindre sont encombrés et il est difficile de placer convenablement le dia-

pason. D'ailleurs, ce diapason pourrait ébranler le support qui le porte et, par suite, déformer la courbe du phénomène enregistré ; il y a donc tout intérêt à transmettre ses indications à un signal indépendant.

SIGNAUX ÉLECTRIQUES

Les signaux dont on se sert en physiologie ont été construits sur les indications de M. Marcel Desprez et peuvent, lorsqu'on s'en sert convenablement, donner 700 à 800 indications par seconde, ce qui dépasse de beaucoup les nécessités de la pratique.

Ces signaux se composent d'un très petit électro-aimant pouvant attirer un petit fer doux très léger. Ce fer doux est mobile autour d'un axe qui porte un

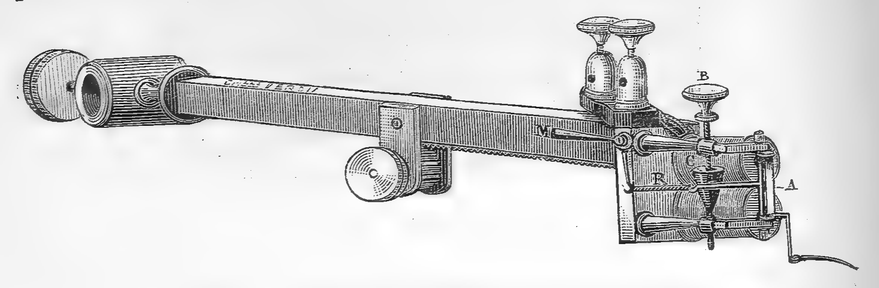


Fig. 108. — Signal électro-magnétique de M. Marcel Desprez.

petit stylet. Ce sont les oscillations de ce stylet que l'on enregistre sur le cylindre tournant. Lorsque le courant cesse de passer dans le signal, il faut que le fer doux s'éloigne de l'électro-aimant ; cet effet s'obtient à l'aide d'un petit ressort que l'on tend convenablement. Il faut avoir soin de ne pas laisser ce contact en fer doux se coller sur le fer doux de l'électro-aimant ; sans cela, il ne s'en sépare plus que difficilement par suite du magnétisme rémanent. Ce phénomène s'évite facilement en interposant, entre les deux surfaces en vue, une petite feuille de papier de soie que l'on y colle avec un peu de cire molle.

Une vis de réglage permet aussi de faire varier la distance du contact en fer doux et de l'électro-aimant ; nous verrons plus loin l'utilité de ce dispositif.

A

B

Fig. 109.

Réglage des signaux électriques. — L'emploi des signaux électriques n'est pas limité au pointage des temps sur la ligne des abscisses ; d'une façon générale, ils sont destinés à marquer sur un cylindre enregistreur le moment auquel se passe un phénomène, ou le temps qui s'écoule entre deux phénomènes.

Par exemple, supposons qu'un corps tombe en chute libre et que l'on veuille connaître le temps qui s'écoule entre son passage en A et son passage en B ; on s'arrangera de façon que le corps, au moment de son passage en chacun de ces points, ferme le circuit d'une pile et actionne un signal électro-magnétique. Les deux signaux inscrivent leurs indications sur un cylindre enregistreur à côté d'une ligne

sur laquelle un troisième signal marquera les divisions du temps données par un diapason. Si les indications des signaux correspondant à A et à B étaient instantanées, l'approximation du résultat obtenu ne dépendrait que de la précision avec laquelle on peut lire les tracés. En réalité, il n'en est pas ainsi ; les signaux électro-magnétiques les plus parfaits ont un retard, aussi bien au commencement qu'à la fin du courant. Si ce retard n'est pas le même pour les deux signaux, il s'introduit, dans l'enregistrement, une erreur de ce chef. Il faut donc, lorsque l'on veut faire une expérience de précision, régler les signaux dont on se sert de façon que leurs indications soient identiques. Voici comment se fait ce réglage.

On place dans le circuit d'une même pile un interrupteur et les deux signaux que l'on veut régler. Les styles enregistreurs des deux signaux sont au contact d'une surface enfumée animée d'une translation rapide. Pendant cette translation, on fera, à l'aide de l'interrupteur, des fermetures et des ruptures de courant ; il sera ensuite aisé de constater si les deux signaux s'arment et se désarment simultanément. En général, cela n'aura pas lieu. On commencera alors par régler l'égalité au moment de la rupture ; pour cela, on agira sur les petits ressorts tenseurs du contact en fer doux, on armera davantage celui dont le mouvement est le moins rapide. Avec quelques essais et tâtonnements, on arrivera rapidement à un résultat satisfaisant. Puis on s'occupera de régler la simultanéité dans les indications du commencement du passage du courant ; il suffira, pour cela, d'agir sur la vis de réglage qui rapproche ou éloigne le contact en fer doux de l'électro-aimant. Ce petit réglage se fait rapidement et dès lors les signaux fonctionnent simultanément ; il n'y a plus lieu de s'inquiéter de leur retard.

TAMBOURS DE MAREY

Il est parfois possible de relier le point mobile dont on veut enregistrer les déplacements au levier ou au tracelet destiné à inscrire ces déplacements sur le cylindre enregistreur, mais plus souvent le dispositif général d'une expérience étant très compliqué, il est difficile ou même impossible d'accumuler au voisinage du cylindre enregistreur les divers appareils dont on a besoin. D'autres fois, le corps sur lequel on veut enregistrer un phénomène est mobile et ne peut être suivi dans tous ses mouvements par l'appareil enregistreur ; c'est ce qui arrive, par exemple, dans l'étude de la marche et de la locomotion des animaux. Les signaux électriques nous permettent déjà de transmettre à distance toutes les indications relatives au temps, mais ils ne sont d'aucune utilité dans ce qui concerne la forme d'une courbe. L'appareil qui permet de transmettre un mouvement à distance se compose d'un manipulateur et d'un récepteur. Nous allons d'abord décrire le récepteur. Il consiste essentiellement en une petite cuvette ou petit tambour métallique de forme très plate et représenté en coupe par AB. Le fond de cette cuvette est percé d'un trou C, en communication avec un tube métallique CE. La partie supérieure de la cuvette est recouverte par une membrane en caoutchouc MN au milieu de laquelle repose un petit disque métallique très léger D.

Ce disque est articulé en H, avec un levier mobile en un point fixe O. Il est aisé de voir que si l'on vient à comprimer de l'air par le tube EC, la membrane de caoutchouc se gonflera et le levier OH se soulèvera; son extrémité I inscrira sur le cylindre enregistreur toutes les compressions d'air qui se produisent.

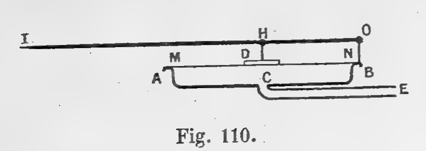
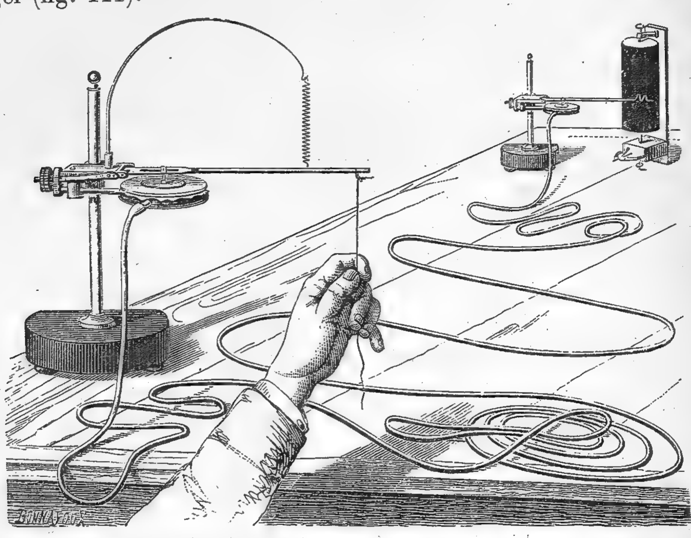


Fig. 110.

Ce récepteur est relié à un autre tambour du même genre par un tube en caoutchouc fixé en E. Ce deuxième tambour ne diffère du premier que par son levier qui est très rigide et solide, alors que celui du récepteur est surtout léger (fig. 111).


Fig. 111. — Tambours à levier conjugués pour la transmission des mouvements à distance.

Il est aisé de voir qu'à chaque abaissement du levier du manipulateur, il se produit une onde de compression qui se transmet par le tube de caoutchouc au récepteur dont le levier se soulèvera. Les diverses excursions du manipulateur seront ainsi transmises, et il suffira de placer le levier du récepteur contre le cylindre tournant, pour y enregistrer la courbe représentant le mouvement de l'extrémité du levier du manipulateur.

Au lieu d'employer comme manipulateur un tambour de Marey, on se sert parfois d'appareils divers que suggèrent les nécessités de chaque expérience; mais tous ces instruments sont basés sur le même principe, et ont pour effet de produire dans le récepteur une série de compressions de l'air.

Les tambours de Marey ont subi diverses modifications de détail ayant pour but de les rendre réglables, et de faciliter leur mise en place sur les supports du chariot automobile.

Lorsqu'on vient d'installer une transmission de mouvement à l'aide de signaux à air, il arrive souvent, par suite des mouvements donnés aux appareils, que la pression du gaz à l'intérieur de ces appareils se soit élevée ou

abaissée par rapport à la pression atmosphérique. Pour ramener l'égalité de pression à l'intérieur et à l'extérieur, ce qui est une bonne condition de fonctionnement, comme le démontre l'expérience, il suffit d'ouvrir une petite soupape qui se trouve sur le tube de réunion du manipulateur et du récepteur. Aussitôt la soupape fermée, l'appareil est en bon état.

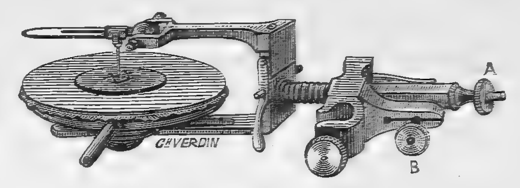


Fig. 112. — Tambour à levier récepteur.

Contrôle et correction des tambours de Marey. — Les mouvements ne se transmettent pas instantanément du tambour manipulateur au récepteur; il y a un certain retard plus ou moins grand, suivant la longueur et le diamètre du tube de caoutchouc qui relie les deux tambours. Il est très simple de mesurer la vitesse de propagation d'une onde aérienne dans le tube de caoutchouc qui relie ces deux signaux. Pour cela, on prend un tube aussi long que possible aux extrémités duquel on place deux tambours dont les styles sont au contact d'un cylindre enregistreur. On donne un choc sur un point du tube en caoutchouc; il en résulte deux ondes allant en sens inverse et provoquant une indication des signaux. Si le choc a été donné à égale distance des deux tambours, les deux indications se produisent en même temps; sinon l'appareil le plus éloigné est en retard sur le plus rapproché.

Si l'on a eu soin, comme l'indique la figure, d'inscrire en même temps la courbe d'un diapason donnant 100 vibrations par seconde, on connaît le retard d'un des signaux. Il suffit de mesurer la différence de chemin parcouru par les deux ondes pour en déduire la vitesse de propagation d'une onde de compression dans le tube dont on se sert.

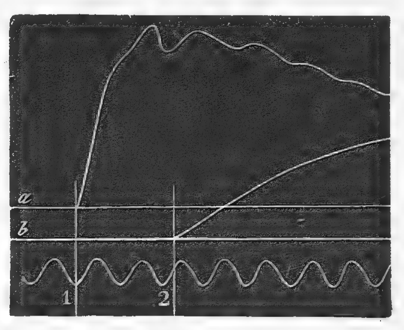


Fig. 113. — Retard des signaux à air.

On emploie généralement des tubes de caoutchouc de 4 millimètres de diamètre intérieur; la vitesse de propagation d'une onde est alors d'environ 280 mètres à la seconde; dans chaque cas, il sera facile de calculer le retard des signaux.

Lorsque l'on emploie deux ou plusieurs tambours simultanément, il faut uniformiser leurs retards, c'est-à-dire prendre pour chacun d'eux des tubes de caoutchouc de la même longueur.

Quand on se sert d'une transmission par signaux à air, il est indispensable de vérifier si la courbe inscrite par le tambour récepteur correspond bien au phénomène étudié. Il faut pour cela que chaque ordonnée de la courbe transmise soit proportionnelle à l'ordonnée correspondante de la courbe que l'on aurait obtenu directement sans transmission. En général, il n'en est pas ainsi et il faut faire une transformation.

Supposons, par exemple, que l'on ait une transmission composée de deux tambours de Marey, que l'on fasse agir sur le levier du manipulateur une force, et que l'on veuille enregistrer la loi de variation de cette force; il faudra s'assurer qu'en prenant une très petite force pour unité, des forces deux fois, trois fois, etc., dix fois plus grandes, donnent au levier du récepteur des déplacements deux fois, trois fois, etc., dix fois plus grands que la première force.

En général, cela n'aura pas lieu; il faudra alors déterminer, par une expérience préalable, à quelles forces correspondent les diverses ordonnées que l'on pourra relever sur la courbe. On suspendra successivement à l'extrémité du levier manipulateur des poids égaux à 1 gramme, 2 grammes, etc., 10 grammes; on notera la hauteur de l'ordonnée tracée par l'extrémité du levier récepteur, et on tracera une courbe en portant en abscisses les déplacements du levier récepteur et en ordonnées les poids. Supposons maintenant qu'une expérience ait donné la courbe de la figure 115, et que l'on veuille tracer la courbe des forces que cette courbe représente; on prendra chaque ordonnée Aa, on la portera en OA sur la figure précédente, et on cherchera l'ordonnée AA_1 correspondante. C'est cette ordonnée que l'on devra porter en AA′. La série des points tels que A′ donnera la courbe représentant réellement la loi de variation de la force exercée au bout du levier manipulateur.

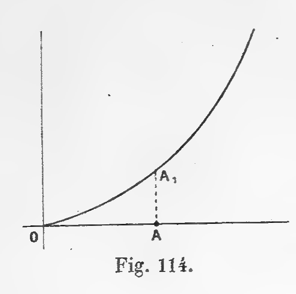


Fig. 114.

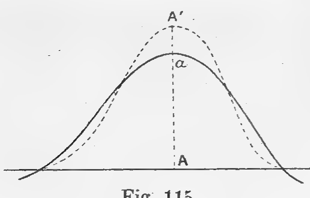


Fig. 115.

Dans chaque cas particulier, il faudra faire une transformation de ce genre.

Lorsque l'on a un grand nombre de courbes à prendre, la transformation que nous venons d'indiquer peut devenir très laborieuse; il y a alors intérêt à se servir, pour opérer automatiquement cette correction, d'un petit dispositif nommé palpeur de Desprez.

Le levier du tambour récepteur, au lieu d'être d'une seule pièce, a une petite articulation au voisinage du point de rotation du levier, comme l'indique la figure 116. Un doigt p se détache du levier en tournant sa concavité vers le tambour de Marey.

Sur le support du tambour se trouve un petit profil sur lequel le palpeur vient frotter au moment de la rotation du levier, et qui modifie le tracé de la courbe, comme nous allons le voir.

Si le profil était un arc de cercle décrit du point de rotation du levier inscripteur comme centre, le palpeur serait toujours en contact avec ce profil sans faire ployer l'articulation du levier qui se comporterait comme s'il était d'une seule pièce; si au contraire ce profil est plus saillant, au moment où la membrane se bombe et où le levier se déplace, il plie forcément par suite du soulèvement du palpeur.

En donnant au profil une forme convenable, on obtient des déplacements

de l'extrémité du levier proportionnels aux phénomènes que l'on veut enregistrer.

Voici comment se fait la détermination de ce profil :

Reprenons l'exemple cité plus haut. On suspend à l'extrémité du levier manipulateur un poids de 1 gramme. L'extrémité du levier récepteur se déplacera, par exemple, de 1 centimètre. Puis on remplace le poids par

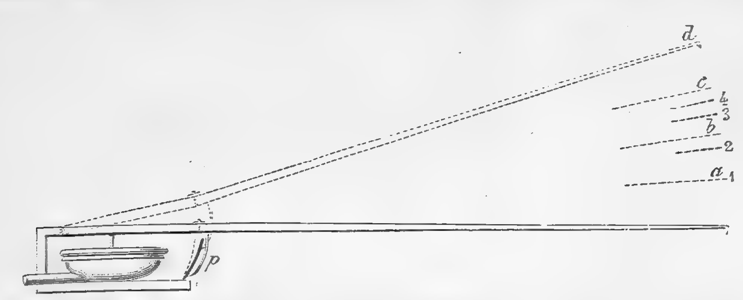


Fig. 116. — Palpeur de Desprez pour corriger les indications des appareils inscripteurs.

2 grammes ; le levier récepteur ne se déplacera pas assez. On plie alors l'articulation du levier, jusqu'à ce que l'extrémité de ce levier ait décrit l'amplitude voulue, c'est-à-dire ait marqué une ordonnée de 2 centimètres, et l'on pointe l'extrémité du palpeur. On répète cette même opération pour divers poids, et la série des points que l'on obtient pour l'extrémité du palpeur détermine la forme du profil.

LA CONTRACTION MUSCULAIRE

Par G. WEISS

Pour étudier la contraction musculaire par les procédés de la méthode graphique, il suffit de relier l'extrémité libre d'un muscle à un petit levier inscrivant ses déplacements sur un cylindre tournant. Le premier appareil de ce genre est dû à Helmholtz (fig. 117). Il se compose essentiellement d'un cadre mobile autour d'un axe, et auquel le muscle à étudier est rattaché par un fil; l'extension du muscle est produite par un petit poids. Le myographe de Helmholtz avait, entre autres inconvénients, celui d'être trop lourd; son inertie déformait la courbe de contraction. Aussi divers physiologistes l'ont-ils modifié. Le meilleur modèle actuellement en usage est celui de Marey (fig. 118). Il est plus spécialement destiné à prendre des tracés de la contraction musculaire de la grenouille. Le muscle gastrocnémien détaché de son extrémité inférieure est relié par un fil au levier myographique. En faisant varier la distance de ce point d'attache au point de rotation du levier, on modifie l'amplitude des tracés. Pour cela, le fil venant du muscle est fixé à un petit curseur mobile le long du levier. Pour exercer sur ce muscle une tension convenable et ramener le levier au zéro au moment de son relâchement, on se sert soit d'un ressort, soit d'un poids tenseur. Le poids tenseur est généralement préférable, car le muscle a ainsi à vaincre une résistance constante; avec un ressort, la traction antagoniste va en croissant avec le degré du raccourcissement. La grenouille soumise à l'expérience est fixée par des épingles sur une plaque de liège portée par le support métallique du myographe. Dans le cas de la figure 118, on voit aussi deux électrodes qui servent à provoquer la contraction par excitation du nerf sciatique.

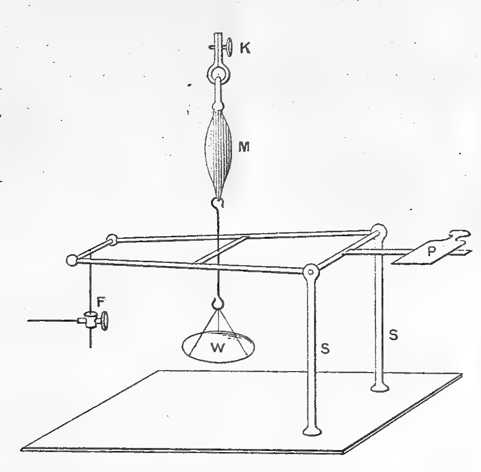


Fig. 117.

Il faut, bien entendu, dans ces expériences, éviter les mouvements volontaires de l'animal qui donneraient un tracé absolument irrégulier. Les deux procédés les plus employés consistent soit à faire usage du curare si l'excitation doit porter directement sur le muscle, soit à détruire la moelle de

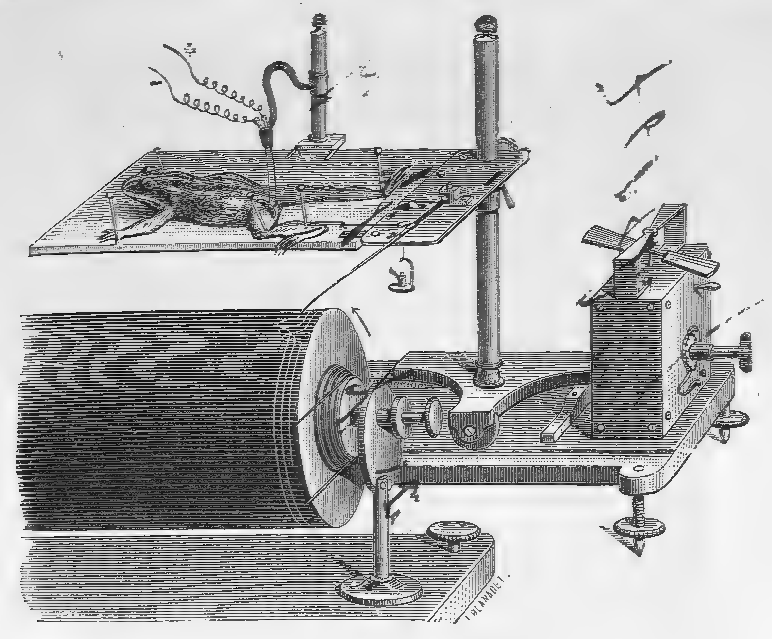


Fig. 118. — Myographe simple.

l'animal si l'on veut conserver l'excitabilité des nerfs. Cette opération se fait facilement avec une aiguille que l'on introduit dans le canal rachidien, immédiatement derrière la tête.

Les résultats que l'on obtient dans le tracé myographique sont influencés par l'état de la circulation. Le tracé 119 fait voir la différence qu'il y a entre

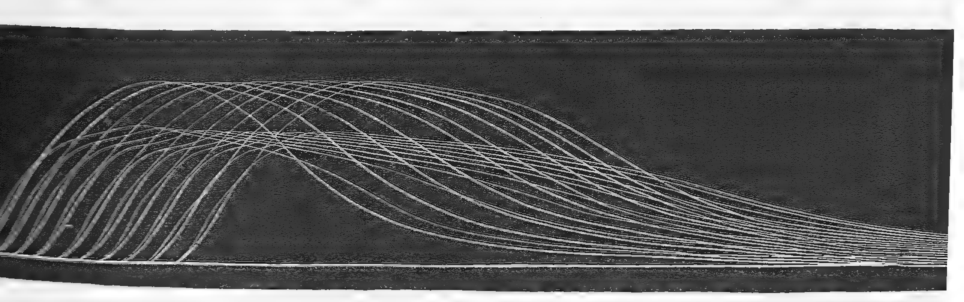


Fig. 119.

les contractions qui se produisent dans une patte de grenouille privée de sa circulation, comparativement à l'autre patte restée à l'état normal. Il faut donc

avoir soin, dans les expériences, de ne pas léser un gros vaisseau de la cuisse, ce qui arrive facilement quand on veut dégager le sciatique.

Pour avoir un tracé disposé régulièrement et permettant une comparaison facile des secousses, on s'arrange de façon que le cylindre produise automatiquement l'excitation à un moment donné de sa révolution. Si le myo-

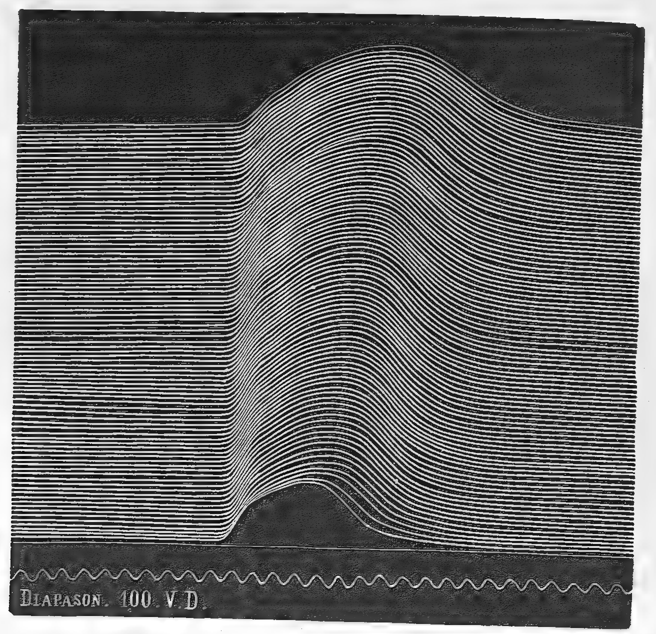


Fig. 120. — Graphiques de secousses musculaires imbriquées verticalement.

graphe est monté sur le chariot automatique pour éviter les superpositions, on a le tracé de la figure 120.

L'excitation automatique se produit à l'aide d'une petite clef de décharge

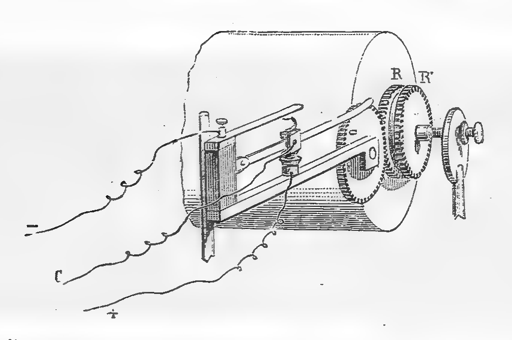


Fig. 121. — Appareil destiné à exciter les nerfs à certains instants de la rotation du cylindre.

(fig. 121). Pour cela, une roue dentée R de 100 dents, montée sur l'axe du cylindre, engrène avec une autre roue pareille R′ munie d'un taquet; c'est ce

petit taquet qui vient agir sur la clef de décharge à chaque révolution du

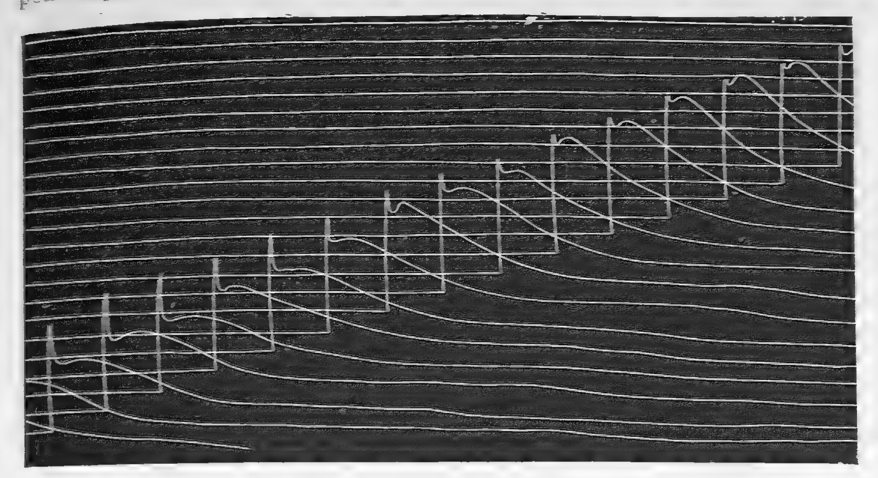


Fig. 122. — Secousses musculaires disposées en imbrication oblique (vératrine).

cylindre. Dans cette disposition des tracés, il y a parfois de légères confusions de lignes si le chariot automoteur ne va pas assez vite. Si au contraire on donne à la roue R′ 101 dents, elle tournera un peu moins vite que le cylindre ; à chaque tour, l'excitation sera un peu en retard sur la précédente et le tracé se disposera d'une façon très lisible comme l'indique la figure 122.

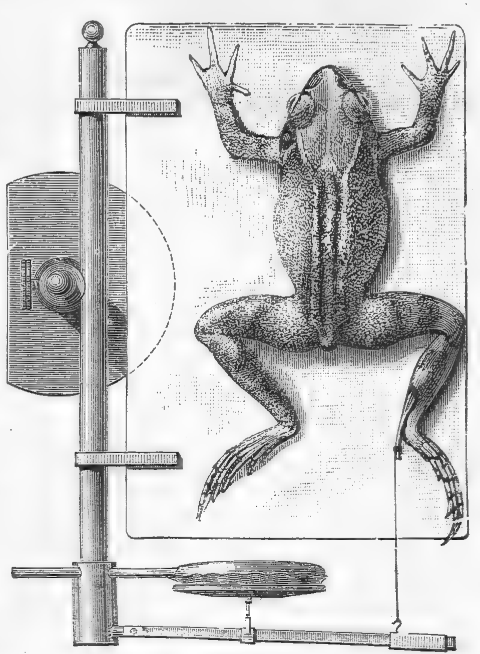


Fig. 123. — Myographe à transmission.

Il est parfois difficile d'inscrire directement les raccourcissements du muscle ; on opère alors par transmission avec des signaux à air. Le muscle est relié au levier d'un tambour manipulateur comme l'indique la figure 123 ; les mouvements de ce manipulateur sont transmis à un tambour récepteur qui inscrira sur le cylindre enregistreur.

Au lieu d'enregistrer la variation de longueur d'un muscle au moment de sa contraction, on peut, en disposant l'expérience comme sur la figure 124, inscrire son gonflement. Ce procédé est du reste le seul applicable sur les animaux que l'on ne veut pas sacrifier et sur l'homme. Pour faire de la myographie sur

l'homme, on emploie un tambour de Marey logé dans une sorte de gouttière comme l'indique la figure 125. Cette gouttière est placée et fixée à l'aide de

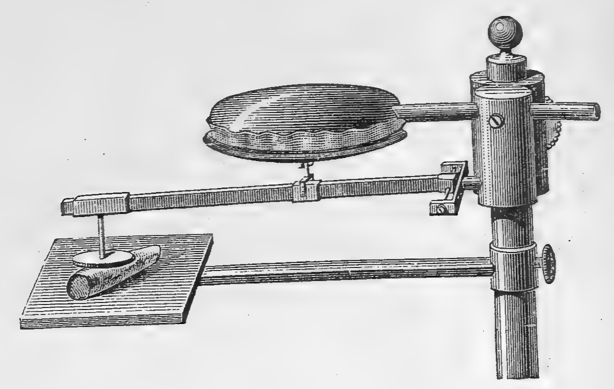


Fig. 124. — Figure théorique du myographe inscrivant les phases du gonflement des muscles.

bandes contre le muscle que l'on veut explorer. Au moment de la contraction du muscle, par suite de son gonflement, le tambour qui se trouve dans la gouttière est comprimé et cette compression est transmise au tambour récepteur.

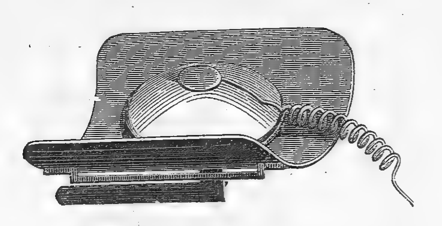


Fig. 125. — Myographe applicable à l'homme; il traduit le gonflement des muscles.

La contraction musculaire peut se produire dans deux conditions bien différentes. Ou bien le muscle se raccourcit sous une force antagoniste constante, ou bien la contraction se produit sans variation de longueur. C'est ce que Fick a distingué sous le nom de contraction isotonique et de contraction isométrique.

Considérons un muscle relié au levier myographique en A, ce levier étant ramené au zéro par un poids tenseur. Il est évident que pendant toute la contraction la traction exercée sur le muscle restera la même ; l'extrémité B du levier inscrira sur le cylindre enregistreur la courbe de raccourcissement du muscle ; la contraction est isotonique (fig. 126).

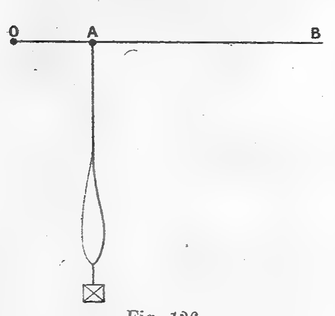


Fig. 126.

Supposons, au contraire, que le fil attaché au tendon se fixe au levier myographique très près de l'axe de rotation, que, par exemple, il soit simplement enroulé sur ce petit axe, la force antagoniste étant produite par un ressort placé à une certaine distance du point O. Lorsque l'on provoquera la contraction, le levier se déplacera, mais le muscle ne pourra pour ainsi dire pas se raccourcir; la contraction sera isométrique (fig. 127).

Si le ressort a été préalablement gradué, l'étude de la courbe tracée par B donnera à chaque instant la force développée par le muscle.

Quand on provoque une contraction musculaire sous l'influence d'une excitation très brève, le muscle se raccourcit et revient presque immédiatement à sa longueur primitive : on a ce que l'on appelle une secousse musculaire.

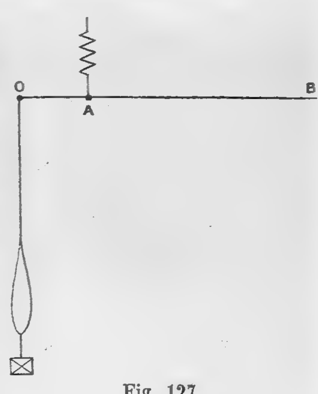


Fig. 127.

La secousse isotonique a été beaucoup plus étudiée jusqu'ici que la secousse isométrique. Cette secousse peut se diviser en trois périodes. On constate d'abord après l'excitation une première période AB pendant laquelle le muscle reste au repos ; elle correspond à ce que l'on appelle la période d'excitation latente ou de temps perdu de Helmholtz ; elle sera étudiée avec plus de détails en électro-physiologie.

En second lieu vient la période d'ascension BC suivie tout aussitôt du relâchement du muscle. Ce muscle ne revient généralement pas immédiatement à sa longueur primitive ; il lui faut pour cela un temps assez considérable.

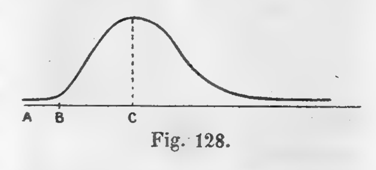


Fig. 128.

La période de descente de la courbe est généralement plus longue que la période d'ascension. La forme générale de cette courbe varie d'ailleurs beaucoup suivant les animaux et même suivant les divers muscles d'un même animal.

Il est difficile, dans les expériences de ce genre, de maintenir la forme de la courbe myographique constante pendant un temps un peu long ; peu à peu cette forme se modifie, l'amplitude du tracé baisse légèrement pendant que la durée générale de la contraction augmente. Cet effet est dû à deux causes, à la fatigue du muscle et aux modifications que les excitations successives apportent à son irritabilité. Ce dernier point sera traité avec plus de détails en électro-physiologie.

Outre la fatigue, diverses influences peuvent modifier la forme de la courbe myographique.

La température agit de la façon la plus nette. Les deux figures ci-jointes montrent ce qui se passe. Lorsque la température est très basse, les contractions sont très allongées, la durée d'ascension aussi bien que celle de descente sont très longues. La température s'élevant jusqu'à 35°, les secousses sont plus brèves, mais à partir de ce moment on les voit diminuer d'amplitude et cesser complètement aux environs de 45°.

La charge que le muscle doit soulever en se contractant a une influence très nette sur la forme de la contraction. En général, la hauteur de la secousse diminue lorsque le poids à soulever augmente ; cependant une certaine tension du muscle est nécessaire, le muscle ayant un raccourcissement plus grand sous une légère traction que sous une traction nulle. Il arrive même parfois

que l'augmentation de la hauteur de la secousse avec le poids tenseur se produise dans des limites assez étendues. La période d'ascension est généralement prolongée par un poids tenseur plus fort, tandis que la période de des-

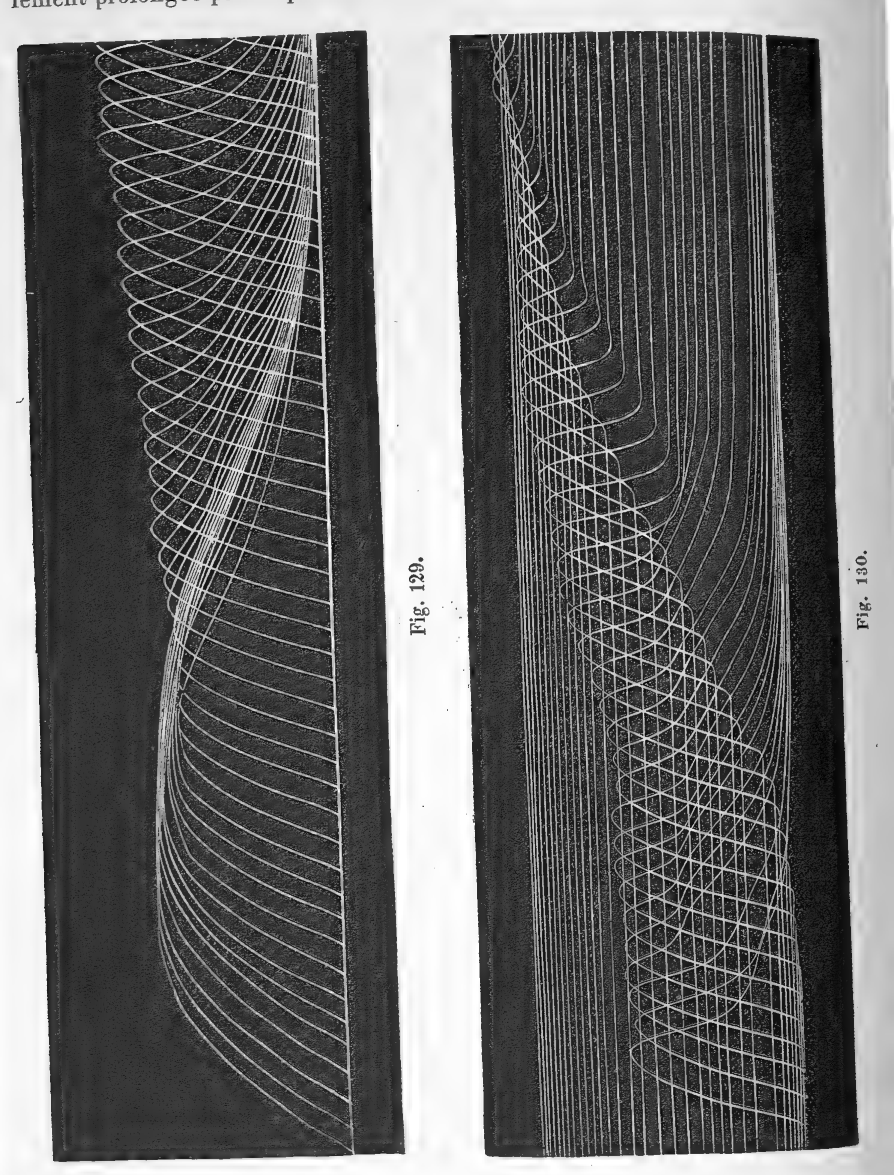


Fig. 129.

Fig. 130.

cente est abrégée. Quand la charge est très faible, cette période de relâchement peut se prolonger pendant un temps fort long.

L'influence de la nature de l'excitation sera étudiée en électro-physiologie.

Nous avons vu que lorsqu'un muscle se contractait, il se raccourcissait en même temps que ses dimensions transversales augmentaient. Divers auteurs

se sont préoccupés de la question de savoir si ces modifications entraînaient un changement de volume du muscle. Plusieurs procédés ont été employés dans ce but. Certains expérimentateurs ont cherché à vérifier directement s'il y avait un changement de volume; pour cela, ils enfermaient un muscle dans un vase contenant de l'eau et ne communiquant avec l'extérieur que par un tube capillaire. En provoquant la contraction, on pouvait vérifier s'il en résultait des déplacements du ménisque dans le tube capillaire. Au lieu d'opérer ainsi, on peut fixer le muscle immergé après un aréomètre très délicat. Si au moment de la contraction le muscle change de volume, il doit en être de même de sa densité, et suivant son état l'aréomètre s'enfoncera plus ou moins dans le liquide sur lequel il flotte. Quelques auteurs nient toute variation de volume; il semblerait cependant qu'au moment de la contraction il y aurait une légère diminution de volume qui n'atteindrait en tout cas pas $\frac{1}{1000}$ du volume du muscle.

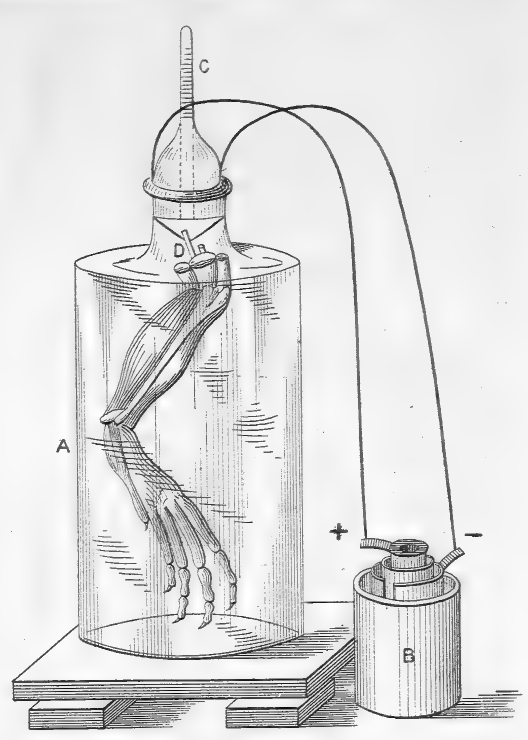


Fig. 131. — Appareil démontrant que le volume du muscle ne change pas pendant sa contraction. — A, flacon rempli d'eau. — B, pile pour exciter le muscle. — C, tube capillaire surmontant le flacon. — D, muscle de grenouille.

L'étude de l'élasticité du muscle à l'état de repos ou de contraction est des plus importantes; aussi les recherches sur ce point sont-elles très nombreuses. Le mot élasticité pouvant prêter à confusion, il y a intérêt à employer, comme l'a proposé M. Marey, les termes rétractilité et extensibilité. L'étude de l'extensibilité du muscle est compliquée par l'existence de ce que l'on appelle l'extensibilité supplémentaire. Lorsqu'on suspend un poids à un muscle, ce muscle ne prend pas immédiatement un allongement définitif; il faut parfois un temps fort long pour que l'on arrive à une longueur définitive immuable. Parfois même il y a d'incessantes variations de longueur consistant en allongements et raccourcissements successifs qui rendent toute détermination presque impossible.

M. Marey a étudié l'extensibilité du muscle en enregistrant son allongement sous l'influence d'une charge régulièrement croissante, puis son retour

à la longueur primitive pendant la diminution de la charge. On constate sur la figure 132 qu'après la disparition totale de cette charge le muscle n'est pas revenu tout à fait à sa longueur primitive. Il y a eu un certain allongement permanent.

Fig. 132.

On voit que l'allongement ne croît pas proportionnellement à la charge ; pour une même surcharge cet allongement est d'autant moindre que l'allongement est lui-même déjà plus considérable. Toutefois, si l'on dépasse une certaine limite, c'est l'inverse qui se produit, comme on le voit sur la figure 132 ; pour une même surcharge l'allongement croît de plus en plus jusqu'à la rupture du muscle.

L'élasticité du muscle pendant sa contraction est encore bien plus difficile à étudier que pendant son repos, car la fatigue devient une cause de complica-



Fig. 133. — Élasticité (d'après M. Marey). — Muscle de grenouille. Rotation très lente du cylindre. Influence d'un poids graduellement croissant. La rupture s'est produite sous une charge de 750 grammes. Quelques instants auparavant, en *a*, la limite d'élasticité a été dépassée.

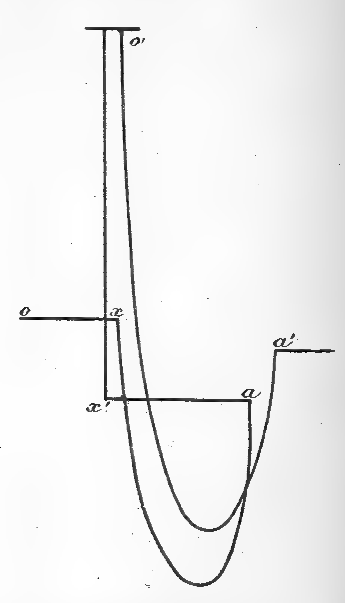


Fig. 134. — Élasticité (d'après M. Marey). — Muscle de grenouille. Rotation lente du cylindre. Sous l'influence d'une charge, le muscle non tétanisé donne la courbe xa. Le muscle tétanisé donne la courbe $a'\ o'$, sous l'influence de la même charge. L'excitation est en x' et le muscle remonte en o' par le fait de sa contraction.

tion extrême. Weber le premier a fait voir que le muscle actif avait une extensibilité plus grande que celle du muscle au repos. La figure 134 fait voir comparativement la courbe d'allongement dans les deux cas.

L'allongement d'un muscle étant plus grand pendant sa contraction qu'à l'état de repos, il peut arriver qu'un muscle portant un poids lourd s'allonge au moment de l'excitation. Ce fait, connu sous le nom de paradoxe de Weber,

a été contredit par certains auteurs et défendu par d'autres. Ce désaccord tient probablement à la nature des muscles sur lesquels ces auteurs ont opéré.

L'élasticité du muscle joue un rôle des plus importants dans tous les phénomènes de la contraction musculaire; Bergonié a fait voir par des expériences très ingénieuses comment cette élasticité influe sur la valeur de la période d'excitation latente et sur le tétanos.

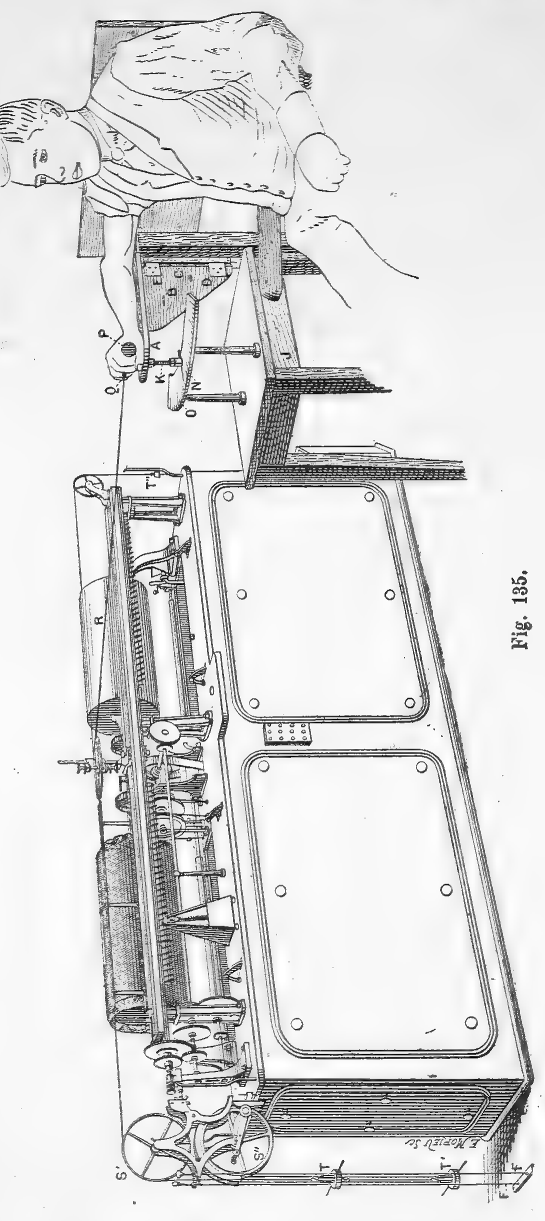


Fig. 135.

Divers auteurs ont cherché à fonder une théorie de la contraction musculaire sur les variations d'élasticité, en considérant ces variations comme le résultat direct de l'excitation du muscle, mais aucun d'entre eux n'avait, semble-t-il, vu la question sous son jour véritable. Récemment M. Chauveau a repris ce sujet d'étude et a fait une série d'expériences dans des conditions de précision qui n'avaient pas été réalisées avant lui. Toutes les mesures ont été exécutées sur l'homme; le muscle se trouvait donc à l'état physiologique normal; quant au dispositif expérimental, il avait déjà été employé par Donders et van Mansveldt, mais non seulement M. Chauveau y apporta divers perfectionnements de détail, mais encore il remplaça la lecture directe par l'enregistrement graphique et obtint de la sorte de magnifiques tracés.

Voici d'abord le principe de la méthode. Les muscles sur lesquels on opère sont les fléchisseurs de l'avant-bras. Dans les premières expériences

de M. Chauveau, comme dans celles de Donders et van Mansveldt, l'humérus était vertical, le coude se trouvant fixé au centre d'un arc de cercle le long duquel devait se déplacer le poignet et sur lequel on lisait les variations angulaires de l'avant-bras quand on augmentait ou diminuait une charge tenue à la main.

La figure 135 représente l'appareil de M. Chauveau avec tous ses perfectionnements. Le bras, au lieu de se déplacer dans un plan vertical, se meut horizontalement sur un support tournant sans frottement autour d'un axe vertical passant par le coude. Il n'y a donc pas à tenir compte du poids de l'avant-bras.

Le poids tenseur T exerce sa traction sur le bras, par l'intermédiaire d'un fil inextensible TSRQ qui entraîne en même temps le style enregistreur.

C'est en T que l'on placera soit les poids devant agir d'une façon continue sur le muscle, soit les surcharges.

Les surcharges T′ doivent être mises en place ou retirées avec beaucoup de soin, sans aucun choc: pour cela, elles sont soutenues par un fil enroulé sur une poulie S″ que l'on manœuvre à l'aide d'une manette. Suivant le sens de la rotation de cette poulie, la surcharge T′ est mise en place ou retirée.

M. Chauveau fait remarquer qu'il n'y a pas lieu de rechercher quelque relation entre les propriétés élastiques du muscle au repos et celles du muscle à l'état de contraction; ce sont là, en effet, deux choses absolument distinctes, et dans son étude M. Chauveau ne s'est occupé que du muscle en activité.

Voici les propositions qu'il formule comme conclusions de ses expériences.

Première proposition. — *Dans un muscle mis en état de grande et parfaite élasticité par une contraction statique raccourcissant le muscle toujours de la même manière, mais avec variations de la valeur de la charge soutenue, une même surcharge produit des allongements dont la valeur est inversement proportionnelle à celle de la charge.*

C'est-à-dire que tout se passe comme si le muscle prenait un coefficient d'élasticité proportionnel à la charge qu'il soutient.

Deuxième proposition. — *Dans un muscle inégalement raccourci et soutenant ainsi sa charge à des hauteurs différentes, si cette charge reste la même l'allongement produit par une même surcharge reste toujours le même.*

Troisième proposition. — *La valeur de l'allongement provoqué par une surcharge* P *dans un muscle en contraction statique pour le soutien d'une charge,* p *est proportionnelle à la valeur du rapport* $\frac{P}{p}$ *de la charge à la surcharge.*

Cette proposition résulte des deux précédentes.

Quatrième proposition. — *Dans un muscle pris en un certain état de raccourcissement et soutenant une charge donnée, si le raccourcissement s'accroît d'une manière régulière, la surcharge nécessaire pour faire disparaître le surcroît de raccourcissement s'accroît d'une manière exactement symétrique.*

En général, lorsqu'un muscle se contracte, cette contraction est totale, il n'y a pas de parties inactives; cependant, dans certaines conditions exception-

nelles on constate dans un muscle la présence de contraction de certaines fibres ne se transmettant pas à la masse du muscle; ce phénomène est connu sous le nom de secousses fibrillaires. Il arrive aussi qu'en donnant un coup brusque à l'aide d'un objet dur, le dos d'un couteau par exemple, en travers d'un muscle fatigué, il se produise une contraction locale qui ne se transmet pas tout le long des fibres musculaires; c'est ce que l'on nomme une contraction idio-musculaire. Cette contraction locale met un certain temps à disparaître. Ces phénomènes ne se produisent que dans des cas exceptionnels; en général, un muscle excité en un de ces points se contracte dans sa totalité. Mais la contraction ne se fait pas simultanément dans tous les points du muscle. Aeby a montré que si l'on place deux leviers myographiques sur un muscle long, il peut arriver que les indications de ces deux leviers ne soient pas concor-

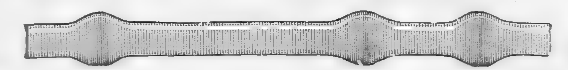


Fig. 136. — Aspect de l'onde musculaire vue au microscope, d'après Aeby.

dantes. Dans ce cas, une onde de contraction se propagerait le long du muscle. Cette onde musculaire peut être vue au microscope. Il suffit pour cela d'arracher une patte à un hydrophile, d'ouvrir avec soin la partie chitineuse et de placer sur une lame de verre un petit fragment du muscle blanc qui y est contenu. On ajoute une goutte du liquide qui coule par la blessure faite à l'animal et on couvre avec une lamelle. En examinant cette préparation au microscope on aperçoit facilement des ondes qui se produisent spontanément et parcourent les fibres musculaires.

M. Marey et divers auteurs ont repris les expériences de Aeby et ont constaté l'existence de l'onde dont ils ont même pu mesurer la vitesse de propagation.

M. Marey se sert dans ce but de deux pinces myographiques à transmission installées comme le représente la figure 137. Le muscle est excité près de l'une des pinces.

La figure 138 représente les tracés obtenus sur le lapin. Le tracé inférieur correspond à un muscle refroidi par de la glace; on voit que dans ce cas l'onde se propage plus lentement. Si l'on excite le muscle par l'intermédiaire du nerf, on ne constate pas d'onde, toutes les parties entrent simultanément en activité. Aussi, pour mettre l'onde en évidence, faut-il opérer sur un muscle curarisé ou bien exciter la partie la plus éloignée du point d'entrée du nerf.

Voici quelques chiffres donnant une idée de la vitesse de propagation de l'onde.

Grenouille..........................	3 à 4	mètres par seconde.
Lapin..............................	4 à 5	—
Homme..............................	10 à 13	—

Ce dernier chiffre est pris sur l'homme vivant.

Les premiers ont été obtenus sur des muscles séparés du corps de l'animal. Le froid et la fatigue diminuent la vitesse de propagation de l'onde. Il en est de même de certains poisons.

Quelques auteurs ont nié l'importance de l'onde musculaire dans le phénomène de la contraction musculaire, et admettent qu'elle ne se produit qu'aux

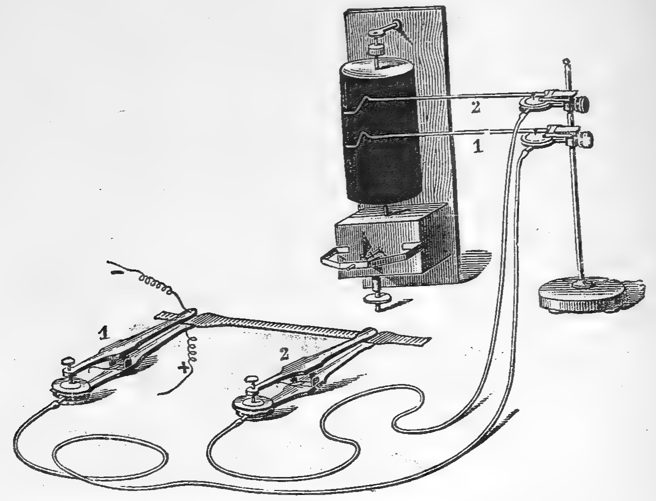


Fig. 137. — Passages de l'onde musculaire explorés au moyen de deux pinces myographiques.

approches de la mort du muscle. En particulier Laulanié, observant au microscope la contraction musculaire dans les larves transparentes de *Correthra*

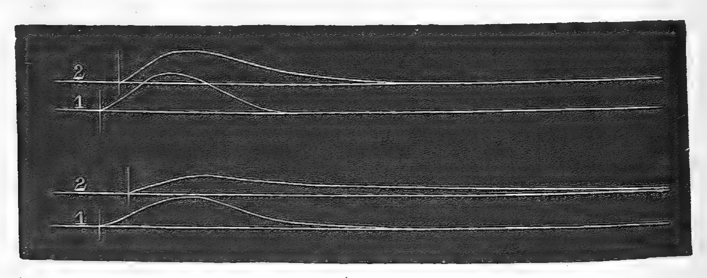


Fig. 138. — Tracés du passage de l'onde musculaire.

pluvicornis, a constaté que sur les larves bien vivantes la contraction se produit simultanément dans toute la longueur de la fibre musculaire. Ce n'est que sur des larves fatiguées et près de périr que l'on observe des ondes parcourant les muscles. Il y a cependant lieu de se demander si chez les larves pourvues de toute leur vitalité les ondes ne sont pas trop rapides pour être perçues à l'œil.

Des essais de chronophotographie n'ont permis de déceler aucune onde sur le muscle hyoglosse et mylo-hyoïdien de la grenouille.

La contraction musculaire est accompagnée de phénomènes calorifiques et électriques qui seront étudiés en détail plus loin.

LOCOMOTION HUMAINE

Par le Dr Paul RICHER.

Cet article sera divisé en trois parties.

Dans la première partie, nous étudierons, en manière d'introduction, les conditions physiologiques de la contraction musculaire. La seconde traitera de l'équilibre du corps humain et des diverses attitudes de station, autrement dit de la statique humaine. La troisième partie comprendra l'étude de la dynamique humaine, c'est-à-dire des différents mouvements de l'homme et plus spécialement des mouvements de locomotion (1).

I. — PHYSIOLOGIE DU MUSCLE SUR LE VIVANT

A. — DE LA FORME DU MUSCLE SUR LE VIVANT

La physiologie du muscle a été faite ailleurs dans cet ouvrage. Je crois nécessaire néanmoins d'insister ici sur quelques détails considérés à un point de vue tout à fait spécial, un peu négligé jusqu'ici, et néanmoins d'une grande importance dans les études de mécanique humaine. Je veux parler de l'étude du muscle en action, conservant toutes ses connexions anatomiques et physiologiques, c'est-à-dire dans les conditions normales de son fonctionnement.

L'examen méthodique du nu sera pour cette étude notre principal procédé d'investigation.

Nous devons donc chercher à définir tout d'abord la forme du muscle sur le vivant, et les modifications de cette forme en rapport avec les états physiologiques variés par lesquels le muscle peut passer.

Mais auparavant, rappelons quelques détails anatomiques nécessaires. Sur le vivant, si la musculature se devine aisément sous la peau, il n'en faut pas moins quelques études spéciales pour arriver à lire facilement le nu et à distinguer la raison de toutes les saillies ou dépressions qu'on y observe. C'est là le but de l'anatomie des formes et nous n'avons pas à y insister ici. Quelques mots seulement sur la forme du muscle. Il importe de bien pré-

(1) J'ai fait pour cet article de nombreux emprunts à mon livre : *Physiologie artistique*. Doin, éditeur, 1895.

ciser que cette forme ne dépend pas seulement du mode de structure du muscle lui-même. Elle est en outre grandement influencée par les faisceaux et plans fibreux périmusculaires. Nous savons, en effet, que tous les muscles sont contenus dans une gaine aponévrotique plus ou moins dense au milieu de laquelle ils glissent dans leurs phases de raccourcissement et d'allongement. Cette enveloppe les maintient dans leurs rapports réciproques, et empêche les déplacements que le jeu des leviers osseux qu'ils font mouvoir ne manquerait pas d'entraîner. Les pressions que subissent les corps charnus musculaires, de la part de cette enveloppe et des faisceaux qui la doublent en certains points, ont pour effet d'altérer la forme du muscle lui-même en y produisant des dépressions et des sillons bordés de saillies. Ces sillons se produisent d'ordinaire dans le relâchement musculaire, et ont une direction *perpendiculaire à la direction des fibres charnues.*

Par contre, les faisceaux musculaires eux-mêmes, lorsqu'ils se contractent deviennent plus distincts, par suite de leur gonflement. Ils sont séparés par des sillons dus à la cloison fibreuse qui les sépare et ne saurait se distendre en proportion. Ces sillons, indices de la contraction musculaire, sont donc, par opposition à ceux que nous venons de signaler, *parallèles à la direction des fibres charnues elles-mêmes.*

Il résulte de l'examen fait sur le vivant que chaque muscle a une forme qui lui est propre, et que pour distinguer les différences morphologiques de ses différents états d'activité ou de repos nous ne pouvons plus nous en tenir à cette formule simpliste : quand un muscle se contracte, il se raccourcit et augmente en même temps d'épaisseur. C'est beaucoup plus compliqué dans la nature, et nous verrons que gonflement et raccourcissement ne sont ni les seuls caractères, ni les signes indispensables de la contraction.

B. — LES DIVERS ÉTATS PHYSIOLOGIQUES DU MUSCLE

Au point de vue morphologique, nous distinguerons trois états physiologiques du muscle, le relâchement, la contraction et la distension.

Nous allons définir ce que nous entendons par chacun de ces trois états, et leur assigner des caractères morphologiques spéciaux.

Relâchement. — C'est véritablement l'état d'inaction du muscle. Il y a relâchement lorsque l'élasticité musculaire cesse d'être sollicitée et que le muscle se trouve dans un état d'équilibre stable, d'où il ne pourra sortir que pour se raccourcir davantage sous l'influence de la contraction ou pour s'allonger par l'effet de la distension. Pour nous, un muscle relâché est un muscle dont les fibres ne suivent plus le plus court chemin de la ligne droite entre ses points d'attache au squelette, et la chose se produit pour tous les muscles de l'économie, lorsque, dans l'état d'inaction, leurs insertions extrêmes sont rapprochées au delà d'une certaine limite.

Je sais bien que je vais ici à l'encontre d'une idée qui a cours en physiologie, et d'après laquelle, sur le vivant, les muscles sont toujours plus ou moins tendus, ce qu'on reconnaît, dit-on, à la légère rétraction qu'ils subissent quand on les divise en travers. Les uns attribuent cette légère tension

à la tonicité musculaire, les autres à l'élasticité du muscle qui, sur le vivant, serait sans cesse sollicité par les rapports que le muscle présente avec ses points d'attache, de sorte que le muscle serait toujours tendu au delà de sa longueur naturelle de repos complet (1).

(1) Voici, en effet, ce que nous trouvons à ce sujet dans les principaux traités de physiologie, y compris les plus récents.

Béclard (*Traité élémentaire de physiologie humaine.* Paris, Asselin, 1870) s'exprime en ces termes : « Les muscles d'un animal vivant, alors même qu'ils sont dans le relâchement ou plutôt dans l'état de *non-contraction*, sont dans une sorte de tension permanente... Elle devient évidente par le retrait des deux bouts d'un muscle, lorsqu'on le divise en travers sur l'animal vivant. »

L'auteur attribue cette tension à la tonicité.

Longet (*Traité de physiologie.* Paris, Germer-Baillière, 3e édit., 1873) décrit ainsi la tonicité musculaire : « Si l'on fait la section d'un muscle, les deux bouts de l'organe se rétractent en sens opposé, et il en résulte un écartement proportionnel à la longueur des fibres. »

Beaunis (*Nouveaux éléments de physiologie humaine.* Paris, J.-B. Baillière, 1876) est encore plus explicite : « Sur le vivant, les muscles n'ont presque jamais leur longueur naturelle ; ils sont tendus, c'est-à-dire tirés à leurs deux extrémités, soit par la contraction des muscles antagonistes, soit par l'élasticité même des pièces du squelette et des parties molles ; aussi, quand on vient à couper le muscle en travers ou à sectionner ses tendons, voit-on ce muscle se raccourcir et ses deux moitiés s'écarter l'une de l'autre jusqu'à une certaine distance. »

Kuss et Duval (*Cours de physiologie.* Paris, J.-B. Baillière, 1876) ont la même opinion : « Cette élasticité du muscle est toujours sollicitée sur le vivant par les rapports que le muscle présente avec ses points d'attache : il est toujours tendu au-delà de sa longueur naturelle de repos complet. »

Monoyer, dans une addition passée inaperçue à la *Physique médicale* de Wundt, entrevoit la véritable solution de la question. Il parle bien de la tonicité « en vertu de laquelle, dit-il, le muscle vivant se trouve dans un état de tension permanente, même lorsqu'il est au repos complet », mais il ajoute avec beaucoup de sagacité : « à condition, toutefois, que la distance mutuelle de ses points d'insertion surpasse sa longueur naturelle ».

Il en est de même d'Imbert, l'auteur de la deuxième édition de la *Physique médicale* de Wundt. Dans son *Traité élémentaire de physique biologique*, il dit : « Les muscles vivants en place et au repos sont *presque* toujours dans un état de tension faible, état auquel on a donné le nom de tonus ou de tonicité. Si l'on vient, en effet, à sectionner un muscle au repos ou son tendon, on constate que les deux parties séparées s'écartent l'une de l'autre. »

L'auteur admet donc la tension faible du muscle au repos et en donne la raison habituelle. Il serait cependant disposé à admettre l'existence possible du relâchement musculaire complet, car il ajoute : « Sans entrer dans le détail des très nombreuses expériences instituées pour établir la cause et le mécanisme encore peu connus de la tonicité musculaire, nous disons que, d'après les recherches les plus récentes, le tonus paraît exister seulement lorsque la distance mutuelle des points d'insertion du muscle est supérieure à la longueur naturelle de celui-ci. La tonicité ne serait donc autre chose que l'élasticité musculaire mise en jeu par une cause toute mécanique, à savoir : un certain degré de distension du muscle. Tschiriew a montré, en effet, que la tonicité disparaît pour certaines positions convenables des membres. »

Tous les éléments de la question sont dans les lignes qui précèdent, mais l'auteur n'a pas su l'en dégager avec une netteté et une précision suffisantes. Aussi les physiologistes qui suivent continuent-ils les mêmes errements.

Landois (*Traité de physiologie humaine.* Traduct. Moquin-Tandon. Paris, Reinwald et Cie, 1893) dit simplement : « Sur le vivant, les muscles sont toujours légèrement tendus, ce qu'on reconnaît à la légère rétraction qu'ils subissent quand on les divise en travers. » L'auteur met cette tension sur le compte de l'élasticité, il n'admet pas la tonicité musculaire.

Hédon (*Précis de physiologie.* Doin, 1896) s'exprime ainsi : « Normalement et dans l'état de repos, l'élasticité du muscle n'est jamais satisfaite ; en effet, un muscle tire constamment sur ses points d'attache ; c'est pourquoi on le voit se raccourcir lorsqu'on sectionne un de ses tendons. » Ce fait, d'après le même auteur, n'est pas la seule conséquence de l'élasticité, il dépend aussi de la *tonicité*.

Enfin, Viault et Jolyet, dans un livre tout récent (*Traité élémentaire de physiologie humaine.* Doin, 1898), émettent la même opinion. « Les muscles au repos, disent-ils, sont disposés sur les leviers osseux de telle façon qu'ils sont légèrement tendus. »

Voilà plus qu'il n'en faut, pensons-nous, pour justifier la persistance que nous mettons à

Or, c'est là une erreur que nous avons déjà relevée, il y a plusieurs années (1).

On admettra bien qu'un muscle n'est nullement tendu, et par suite qu'il est complètement relâché, lorsqu'il se laisse éloigner sans aucune résistance de la ligne droite qui joint ses points d'attache, ou même lorsque son corps charnu s'affaisse sous l'action de la pesanteur au point de décrire une ligne courbe entre ses insertions, ainsi que la chose s'observe facilement sur le biceps, par exemple, lorsque, le bras levé horizontalement, le coude repose sur un appui et que tout le membre est inerte.

Le relâchement peut se traduire encore par des replis transverses du corps charnu ou des tendons eux-mêmes, non moins démonstratifs. Et je puis citer, dans cet ordre d'idées, les sillons transverses qui divisent les masses lombaires dans la station droite, le repli que, dans l'extension forcée de l'avant-bras, le tendon du triceps brachial forme au-dessus de l'olécrâne, le sillon qui coupe transversalement le tendon rotulien dans la station droite, etc.

Sur la grenouille, et aussi sur les autres animaux, le relâchement musculaire physiologique est très facile à constater. Il suffit, après avoir dépouillé une patte de grenouille par exemple, de placer l'articulation du genou dans la flexion et l'articulation du pied dans l'extension pour voir le gastrocnémien se plisser transversalement. Ces plis existent aussi bien sur le corps charnu que sur le tendon. Si l'on vient alors à couper par le milieu le corps charnu du muscle, on constate que les surfaces de section restent en contact, et l'écartement généralement signalé et mis sur le compte de la tonicité ou de l'élasticité musculaire ne se produit pas. Pour que l'écartement ait lieu, il faut que le muscle ait été mis préalablement dans un état de distension plus ou moins considérable. D'où je conclus que, dans l'expérience citée plus haut, lorsque les deux tronçons d'un muscle sectionné en travers s'écartent, c'est que le muscle, au moment de la section, était plus ou moins distendu.

C'est d'ailleurs ce qui arrive toujours si l'on n'a pas soin de placer le membre, pour chaque muscle ou groupe musculaire, dans une position déterminée.

Il faut donc conclure, contrairement aux idées courantes, que le muscle sur le vivant n'est pas toujours dans cet état de tension d'ailleurs éminemment favorable à son action, ainsi qu'on l'a fort justement remarqué. Le relâchement complet et absolu existe; et certainement il a aussi ses avantages pour le bon fonctionnement de la machine humaine, ainsi que nous le verrons plus loin. Mais si la tension musculaire n'est point permanente, elle se produit fréquemment par l'écartement des points d'insertion, soit sous l'influence de la pesanteur, soit par l'action des antagonistes. Et, dans toutes les actions musculaires un peu violentes, on peut signaler une période de préparation qui consiste justement dans la mise en état de tension plus ou moins considérable des muscles qui doivent agir.

démontrer l'existence sur le vivant du *relâchement musculaire complet* et son importance au point de vue de la mécanique humaine.

(1) Note sur la tension musculaire dans les conditions physiologiques (*Société de biologie*, 17 février 1894).

Le muscle peut sortir de l'état de relâchement dans lequel ses fibres ont une longueur fixe et moyenne toujours la même, de deux façons : ou en se raccourcissant ou en s'allongeant, par la contraction ou par la distension.

Distension. — La distension se produit lorsque les insertions du muscle sont écartées l'une de l'autre par l'action des antagonistes ou par tout autre cause, au delà de la distance que comporte l'état de relâchement. C'est alors que le muscle est véritablement tendu et que ses fibres suivent toujours le chemin le plus court entre ses points d'attache. Cette tension, lorsque le muscle est au repos, s'accompagne toujours d'un allongement considérable des fibres charnues mettant en jeu l'élasticité propre au tissu musculaire. Suivant les régions, cet allongement n'est arrêté que par la limite de l'élasticité du muscle lui-même, ou bien, il est limité par une disposition spéciale des leviers osseux. C'est ainsi que le biceps ne peut être allongé qu'autant que le permet l'extension de l'avant-bras sur le bras, limitée par la rencontre de l'olécrâne avec l'humérus, tandis que les extenseurs des doigts ne rencontrent aucun obstacle mécanique à leur allongement, et que la limite de leur extensibilité seule empêche la flexion simultanée des doigts et du poignet de se produire aussi complète que possible.

La distension mettant en jeu l'élasticité du muscle n'est plus un état de repos complet. Le muscle accomplit un travail, puisqu'il oppose une résistance, alors même qu'il n'entre pas en contraction; mais il arrive souvent que la contraction se surajoute à la distension, ainsi que nous le dirons plus loin, et comme l'a fait observer M. le professeur Ranvier il y a déjà longtemps.

Il y aurait donc lieu de distinguer deux sortes de distensions : la *distension passive*, lorsque le muscle se laisse distendre sans entrer en contraction, et la *distension active* qui s'accompagne de contraction.

Contraction. — La contraction est l'état vraiment actif du muscle; mais le point sur lequel je veux insister après M. Ranvier, c'est qu'elle peut survenir sur un muscle distendu aussi bien que sur un muscle relâché, avec cette différence, toutefois, que le relâchement cesse par le fait même de la contraction, tandis que la distension peut persister à ses divers degrés, malgré l'état de contraction du muscle. C'est là un fait d'une importance capitale au point de vue de la mécanique animale et qui a jusqu'ici peu attiré l'attention des physiologistes. La contraction musculaire est donc fort mal définie lorsqu'on dit qu'elle consiste dans le raccourcissement et le gonflement du muscle, car elle peut aussi bien exister avec son allongement et son amincissement.

Sur l'homme vivant, il faut donc distinguer la contraction qui s'accompagne de raccourcissement et celle qui s'accompagne d'allongement, car les formes extérieures ne sont naturellement pas les mêmes dans les deux cas.

Ces considérations imposées par la simple contemplation du nu trouvent un appui des plus solides dans les recherches histologiques de M. le professeur Ranvier sur la contraction musculaire. L'éminent professeur du Collège de France a pensé avec raison que la contraction musculaire n'était pas un fait simple et que pour en saisir le mécanisme il convenait d'étudier compa-

rativement les différents états physiologiques dans lesquels le muscle pouvait se trouver.

Il considère que le muscle peut passer par quatre états physiologiques différents : il peut être tendu et au repos ; tendu et contracté ; revenu sur lui-même et au repos ; revenu sur lui-même et contracté.

Le lecteur saisira sous ces dénominations un peu différentes les divers états physiologiques que nous avons distingués : le relâchement, la distension passive ou active, et la contraction avec raccourcissement ou allongement. Je ferai remarquer seulement qu'un muscle contracté, même revenu sur lui-même, c'est-à-dire avec raccourcissement, est toujours, dans l'état physiologique, un muscle tendu. C'est pourquoi le mot de distension m'a semblé préférable, parce qu'à l'idée de tension il ajoute celle d'allongement.

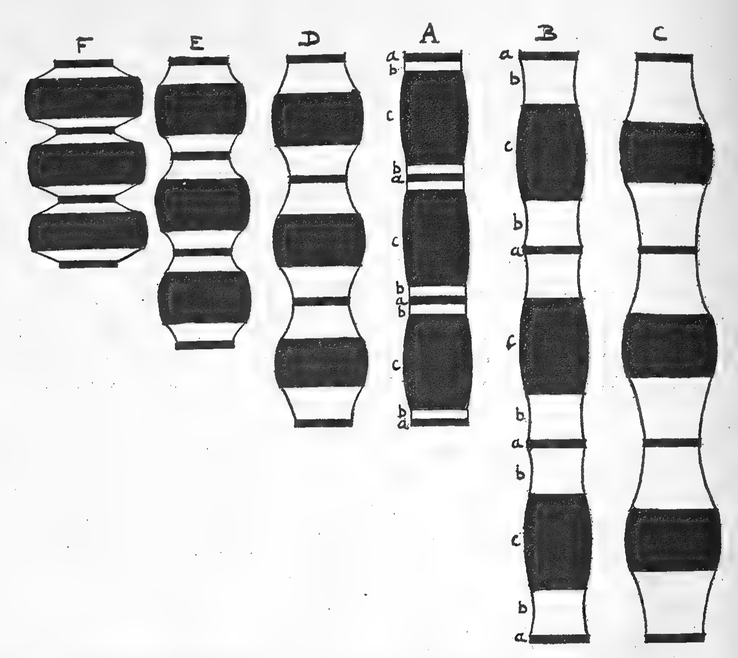


Fig. 139. — Figures schématiques résumant la contraction musculaire, d'après la théorie du professeur Ranvier.

Les schémas ci-dessus (fig. 139) résument la théorie de M. Ranvier sur la contraction musculaire qui s'accorde en tous points avec ce que nous révèle l'examen macroscopique. On sait que les deux grandes qualités du muscle strié sont la contractilité et l'élasticité. On verra que, dans la structure intime du muscle, il existe deux éléments distincts qui sont le siège de ces deux qualités.

A représente une fibrille musculaire striée, revenue sur elle-même et au repos (Ranvier), nous dirons dans l'état de relâchement.

Elle se compose de disques alternativement clairs et foncés disposés dans l'ordre suivant :

a. Disque mince foncé. C'est un élément neutre pour ainsi dire, ne chan-

geant pas de forme quel que soit l'état physiologique du muscle, véritable pièce de charpente destinée à maintenir les rapports des fibrilles entre elles, par son adhérence au sarcolemme, et, par son intermédiaire, aux autres disques minces foncés des fibrilles voisines, situées au même niveau.

b. Disque clair de même dimension formé d'une substance élastique.

c. Disque épais foncé encadré par deux disques clairs et formé exclusivement de substance contractile.

Les mêmes éléments se succèdent dans toute la hauteur de la fibrille.

B représente la même fibrille toujours au repos, mais en état de distension (muscle au repos tendu de Ranvier).

On voit que les disques épais sombres (*c*) n'ont point changé de forme (il n'y a pas contraction), mais les parties élastiques (*b*) se sont allongées et ont augmenté en hauteur.

C. Sur la même fibrille distendue, la contraction amène les changements suivants : le disque épais sombre qui est la partie contractile de la fibre diminue de hauteur pour gagner en largeur, d'où résulte un allongement plus considérable encore des disques clairs élastiques. C'est la fibre musculaire d'abord distendue et dont la contraction accentue encore la tension.

Supposons maintenant que la fibrille A relâchée soit maintenue à ses deux extrémités de façon que la contraction y survenant ne puisse en modifier la longueur ; nous aurons en D des modifications analogues à celles que nous avons signalées en C : diminution de hauteur des disques épais, allongement des disques clairs. C'est la contraction musculaire ne s'accompagnant ni d'allongement, ni de raccourcissement, mais dont l'effet a été de tendre le muscle.

Si la contraction parvient à vaincre la résistance appliquée aux extrémités de la fibre, il se produira alors un raccourcissement et par suite un épaississement proportionnel dû aux changements de forme du disque épais contractile que nous supposons, pour répondre aux faits macroscopiques, gagner exactement en largeur ce qu'il perd en hauteur. Et nous avons les deux schémas E et F, suivant le degré de raccourcissement musculaire, et sur lesquels il nous semble superflu de distinguer les parties constitutives que le lecteur reconnaîtra facilement.

J'ajouterai que, dans l'état physiologique, c'est-à-dire sur un muscle observé dans ses rapports naturels sur le vivant, le raccourcissement, quelque considérable qu'il soit, s'accompagne toujours de tension. Il faut donc admettre que les disques clairs élastiques ne sont jamais entièrement revenus sur eux-mêmes comme sur le muscle relâché (A), ou bien que si leur élasticité n'est plus sollicitée dans le sens de la hauteur, celle-ci étant revenue égale à celle de l'état du relâchement ou même moindre, elle l'est toujours dans le sens de la largeur en vertu de l'élargissement des disques contractiles qui les tiraillent dans ce sens.

C. — CARACTÈRES MORPHOLOGIQUES DES DIFFÉRENTS ÉTATS PHYSIOLOGIQUES DU MUSCLE

Sur l'homme vivant, le *relâchement* musculaire se traduit extérieurement par un relief uniforme plus ou moins arrondi, quelquefois marqué de sillons perpendiculaires à la direction des fibres charnues. Ces sillons sont dus soit au froncement de fibres charnues repliées sur elles-mêmes, soit à la compression de certaines brides aponévrotiques. Enfin, les tendons sont peu saillants, ils se fondent avec les parties voisines, ou bien forment un pli transversal plus ou moins volumineux.

La *distension*, qui est toujours accompagnée de l'allongement du muscle, est la cause d'une forme extérieure tout à fait différente de celle du relâchement. Le relief musculaire est moindre. Il se produit un aplatissement plus ou moins considérable suivant le degré de la distension. On observe en outre quelques sillons parallèles cette fois à la direction des fibres charnues correspondant aux cloisons de séparation des faisceaux secondaires. Les tendons sont tendus.

Un muscle *contracté et raccourci* est remarquable par la saillie de ses fibres charnues et par le relief distinct des faisceaux secondaires qui le composent.

La surface du muscle contracté est d'autant plus uniforme qu'il est composé d'un moins grand nombre de faisceaux distincts. Par exemple, le deltoïde est formé de trois parties, tiers moyen, tiers antérieur et tiers postérieur, dont le modelé, dans le repos du muscle, ne présente guère de différence. Dans la contraction, il n'en est plus de même, et pendant que le tiers antérieur et le tiers postérieur offrent une surface à peu près uniforme, le tiers moyen est marqué d'un grand nombre de sillons qui limitent les faisceaux distincts dont il est composé.

La forme d'un muscle *contracté et distendu* participe à la fois aux formes spéciales à la contraction et à la distension, c'est-à-dire qu'il se distingue par l'accentuation des divers faisceaux dont il se compose et par un relief des fibres charnues variable avec le degré de la distension, mais toujours moindre que le relief dû au simple relâchement musculaire.

La conclusion de ceci, aussi intéressante pour le physiologiste qui veut étudier sur le nu le jeu de la machine humaine, que pour l'artiste qui veut représenter le corps humain en mouvement, c'est que la saillie que fait un muscle ne saurait à elle seule constituer un indice certain de l'état d'activité ou de contraction, pas plus que son aplatissement ne coïncide toujours avec l'état de repos ou relâchement.

On verra presque toujours, sur un muscle distendu, la contraction diminuer le relief au lieu de l'exagérer. Pour juger sûrement de l'état d'activité ou de repos musculaire, il faut faire intervenir un autre élément d'appréciation qui consiste dans le modelé spécial de la région.

Nous avons résumé ce qui précède dans la série des schémas ci-contre (fig. 140). Le muscle représenté n'est pas plus le biceps qu'un autre muscle.

C'est un muscle idéal figuré successivement dans les différents états physio-

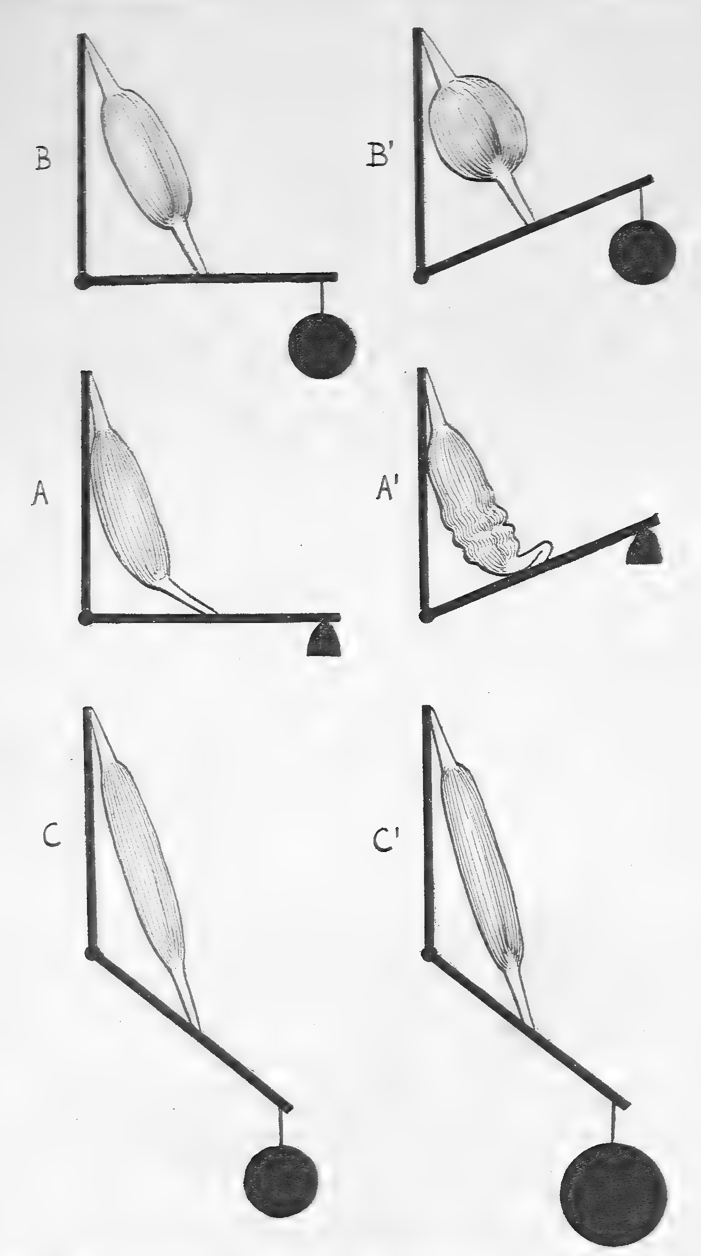


Fig. 140. — Schémas relatifs aux différents états physiologiques du muscle. AA′, relâchement. BB′, contraction. CC′, distension.

logiques étudiés plus haut. En A le muscle est en état de relâchement, le

fibres charnues ont leur longueur naturelle ; il n'est pas tendu, il obéit à la pesanteur ; le corps charnu et le tendon peuvent se plisser transversalement si les points d'attache se rapprochent davantage (A').

En B, le muscle est contracté ; il est en même temps raccourci par suite du rapprochement de ses insertions en deçà des limites de sa longueur naturelle. Il augmente en même temps d'épaisseur. Raccourcissement et épaississement vont ensemble et augmentent avec le rapprochement des insertions (B').

En C, le muscle est distendu par l'éloignement de ses points d'attache au delà des limites de sa longueur naturelle. Il est distendu passivement, si le muscle est en même temps inactif. Mais la contraction peut se surajouter à la distension, et son action a pour effet d'augmenter la tension musculaire et d'accentuer les faisceaux secondaires (C').

On trouvera dans mon livre *Physiologie artistique* un certain nombre d'exemples de ces différents états physiologiques des muscles pris sur le vivant. Nous pensons utile, pour préciser et fixer les idées, d'en rapporter au moins un (fig. 141). Il a trait au muscle triceps brachial.

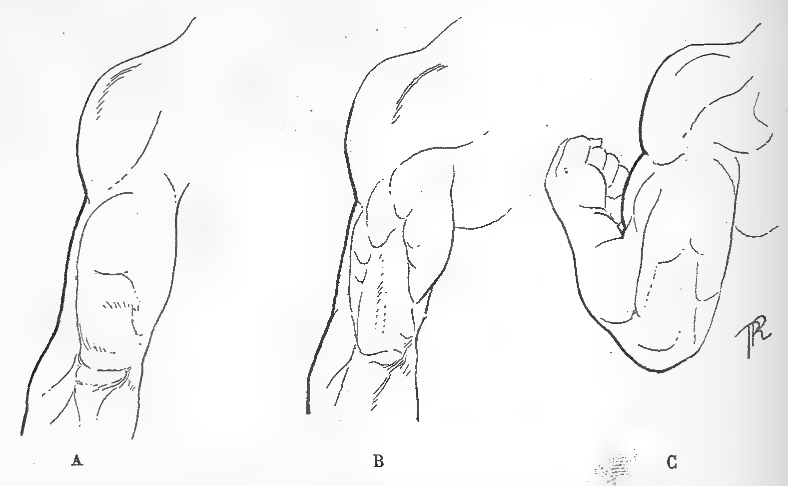


Fig. 141. — Modifications de la forme de la partie postérieure du bras suivant l'état physiologique du muscle triceps. — A, le membre supérieur retombe naturellement le long du corps. Relâchement du muscle. — B, extension forcée de l'avant-bras sur le bras. Contraction avec raccourcissement et gonflement du muscle. — C, Flexion forcée de l'avant-bras sur le bras. Distension du muscle.

En A, le bras étant étendu passivement, le triceps est en état de relâchement avec rapprochement maximum de ses points d'attache. On note que le tendon fait au-dessus de l'olécrâne un repli nettement accentué, le corps charnu est lisse et les fibres ont leur longueur naturelle.

En B, le triceps se contracte énergiquement pour maintenir l'extension de l'avant-bras.

On voit le tendon inférieur se tendre, le corps charnu diminuer de longueur et augmenter d'épaisseur, en même temps que les faisceaux secondaires s'accentuent.

En C, l'avant-bras étant maintenu fléchi par un aide, le triceps est distendu; il s'aplatit, ses fibres charnues augmentent de longueur, les faisceaux secondaires sont légèrement distincts. Si, l'avant-bras étant maintenu par l'aide dans cette position, le sujet faisait effort pour étendre le coude, on verrait la tension du muscle augmenter et les sillons longitudinaux qui limitent ses faisceaux secondaires s'accentuer.

D. — CONTRACTION MUSCULAIRE PHYSIOLOGIQUE

On pourrait croire que, dans un mouvement quelconque, les muscles contractés sont toujours ceux qui se trouvent du côté où se produit le mouvement, par exemple les fléchisseurs si la flexion se produit, les extenseurs si c'est l'extension, et ainsi, du reste, pendant que les muscles distendus sont du côté opposé. La chose serait vraie si la pesanteur était supprimée, si le corps, par exemple, se mouvait dans un milieu aussi dense que lui. Elle est presque exacte pour un homme plongé dans l'eau, pour un nageur, par exemple. Mais, dans les conditions ordinaires de la vie, il n'en va plus de même.

Il ne faut pas oublier, en effet, que tous les mouvements du corps résultent du concours ou du conflit de deux forces agissant simultanément, l'action musculaire d'un côté, et, de l'autre, la pesanteur. Ces deux forces agissent sur les os, qui font office de leviers. D'ordinaire, la pesanteur représente la résistance, le muscle la puissance, et l'articulation le point d'appui. Mais il arrive aussi que les rôles sont intervertis, et que la pesanteur devient la puissance, pendant que la résistance est représentée par la contraction musculaire. Ceci peut avoir lieu pour un même système, suivant sa position dans l'espace et suivant la direction des mouvements. D'autres fois, contraction musculaire et pesanteur, au lieu de se contrarier, agissent dans le même sens et s'ajoutent.

Prenons un exemple :

Considérons les mouvements de flexion et d'extension de l'avant-bras sur le bras. Dans le mouvement de flexion, le système représente un levier du 3e genre. Le point d'appui est à l'articulation, la puissance au point d'attache des muscles fléchisseurs, et la résistance au centre de gravité de l'avant-bras et de la main.

Dans l'extension, les choses changent, et trois cas peuvent se présenter : 1° l'extension est produite sous la simple influence de la pesanteur, l'avant-bras retombe de lui-même, l'action musculaire est nulle; 2° l'extension se fait lentement et l'action musculaire est nécessaire pour contre-balancer en partie l'action de la pesanteur. Dans ce cas, les muscles contractés sont toujours les *fléchisseurs*, bien que le mouvement soit d'*extension*, mais leur rôle est changé; ils résistent à la force qui entraîne le membre. Ils sont maintenant la résistance, et la pesanteur devient la puissance dans le levier du 2e genre que représente alors le système; 3° l'extension est très rapide et dépasse la vitesse imprimée au membre par la seule influence de la pesanteur. Une nouvelle intervention de l'action musculaire est donc nécessaire, mais

elle n'est plus à la même place. La contraction n'est plus dans les fléchisseurs, elle est dans l'*extenseur* qui précipite le mouvement.

La contraction musculaire se présente donc ici sous deux aspects. D'un côté, elle l'emporte sur l'action de la pesanteur, soit qu'elle la combatte, soit qu'elle l'accélère. D'un autre côté, elle cède plus ou moins rapidement à la pesanteur qui entraîne le membre et ne fait plus office que de modérateur. Dans le premier cas, la contraction musculaire est un véritable *moteur*; dans le second, elle remplit le rôle d'un *frein* qui retarde le mouvement.

Il est encore un troisième cas : c'est celui dans lequel la contraction musculaire fait juste équilibre à la pesanteur et maintient le membre immobile dans une position donnée.

Cette dernière forme de la contraction a été appelée *contraction statique*.

La contraction *dynamique* est celle qui accomplit un travail mécanique en élevant un poids à une certaine hauteur. On la désigne aussi sous le nom de contraction dynamique avec travail positif.

J'appellerai *contraction frénatrice* celle qui simplement retarde la chute du membre entraîné par la pesanteur. C'est la contraction dynamique avec travail négatif des auteurs (1).

Cette dernière forme de la contraction est d'un usage extrêmement fréquent dans la mécanique humaine. Que l'homme se penche en avant, en arrière ou sur le côté, qu'il s'accroupisse, qu'il abaisse lentement les membres après les avoir élevés, c'est la contraction frénatrice qui intervient. En un mot, elle existe dans une des phases de tout mouvement d'une vitesse lente ou modérée, se produisant dans un plan vertical ou oblique. Elle a pour caractère de siéger dans les muscles dont l'action est antagoniste du mouvement exécuté, dans les fléchisseurs, par exemple, lors du mouvement d'extension, dans les élévateurs, lors de l'abaissement, etc. Elle se présente, au point de vue morphologique, sous les mêmes apparences que la contraction dynamique.

Les photographies instantanées montrent que, dans les conditions de vitesse signalées plus haut, c'est-à-dire avec une vitesse lente ou modérée, la forme d'un membre ne diffère pas sensiblement, qu'il s'étende ou se fléchisse, qu'il s'abaisse ou s'élève, etc. Les figures 142 et 143 contiennent des exemples parfaitement concluants pris dans les séries chronophotographiques faites récemment avec M. Londe (fig. 142, I et II, III et IV ; fig. 143, I et II). Néanmoins, j'ai constaté d'une façon très nette, entre ces deux formes de la contraction musculaire, une différence que ne donne point la photographie, mais parfaitement appréciable à l'œil.

Dans la contraction frénatrice, le muscle est le siège de petites palpitations.

(1) Je crois que cette dénomination de contraction frénatrice ne peut donner lieu ici à aucune confusion. Elle a pour grand avantage de simplifier le discours en remplaçant toute une périphrase qui est celle de *contraction dynamique avec travail négatif*. Toute contraction musculaire est dynamique, et la contraction que l'on appelle *contraction statique* n'est pas autre chose qu'une contraction dynamique sans travail mécanique. Combien, cependant, la dénomination usitée de « contraction statique » est plus claire, plus simple et nous semble préférable. De même, réservant le nom de contraction dynamique à celle qui s'accompagne d'un travail mécanique positif, ne convient-il pas de chercher un autre nom pour la contraction dite contraction dynamique avec travail négatif, et celui de *contraction frénatrice* nous a semblé le plus clair et le plus commode.



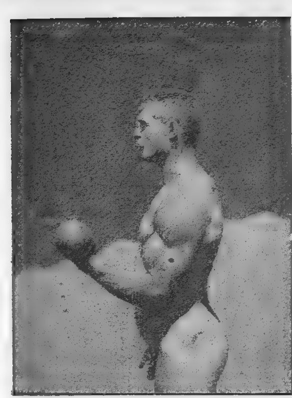
I. Flexion.



II. Extension.



Mouvement lent.



III. Flexion.



IV. Extension.

Mouvement avec poids dans la main.



V. Flexion.



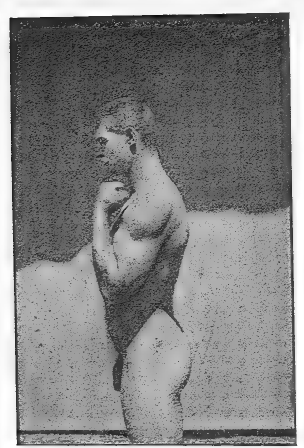
VI. Extension.

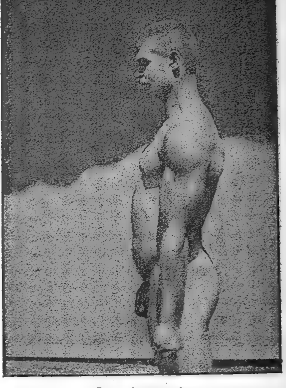
Mouvement rapide.

Fig. 142. — Mouvements de flexion et d'extension de l'avant-bras sur le bras.

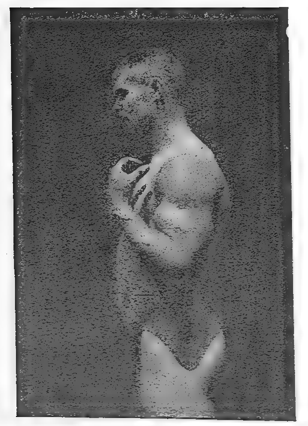


I. Flexion. *Mouvement avec traction.* II. Extension.





III. Flexion. *Mouvement rapide.* IV. Extension.



V. Flexion. *Mouvement lent.* VI. Extension.

Fig. 143. — Mouvements de flexion et d'extension de l'avant-bras sur le bras (*Suite*).

Il n'y a pas là de différence fondamentale, car les palpitations peuvent se voir aussi dans la contraction dynamique. Mais elles sont moins accentuées et plus rares. En tous cas, l'opposition entre les deux formes de contraction est très nette, car elles existent constamment, et en grand nombre, dans la contraction frénatrice. La différence est frappante, lorsqu'on regarde le biceps, alors que l'avant-bras se fléchit et s'étend; le deltoïde, lorsque le bras s'élève et s'abaisse; les masses sacro-lombaires, alors que le tronc se fléchit ou s'étend, etc.

Cette palpitation du muscle se traduit sur les tracés obtenus avec le myographe par des irrégularités de courbe musculaire toujours plus accentuées dans la descente que dans la montée. Il semble que le muscle se décontracte par saccades et non pas d'une façon uniforme.

Il ne serait pas sans intérêt, pour l'étude que nous poursuivons en ce moment, de savoir exactement quelle est la valeur de l'effort musculaire déployé dans ces diverses formes de la contraction. Malheureusement, la solution du problème est entourée des plus grosses difficultés qui découlent toutes de ce fait qu'il n'y a aucune parité entre le travail musculaire intérieur et le travail extérieur produit ou travail mécanique. On a cherché alors la mesure de l'effort musculaire dans la mesure de l'énergie qui est à son origine, laquelle énergie, suivant les circonstances, se transformerait partiellement ou totalement en chaleur sensible. Mais la mesure de l'échauffement des muscles n'a pas encore donné entre les mains des divers auteurs des résultats concordants, et nous n'avons pas à aborder ici cette question encore à l'étude.

On peut se faire théoriquement une idée des valeurs relatives en question, par les raisonnements suivants très simples.

Je suppose trois cas de flexion à angle droit de l'avant-bras sur le bras, dans chacun desquels le biceps soit dans un état de contraction différent.

Dans le premier cas, le membre est immobile, le biceps est en contraction statique.

Dans le deuxième cas, l'avant-bras se fléchit, le biceps est en contraction dynamique avec travail positif.

Dans le troisième cas, le membre s'étend, le biceps est en contraction dynamique avec travail négatif (contraction frénatrice).

Dans les trois cas, l'effort musculaire est comparable, car le degré de raccourcissement du muscle est le même, la charge est également la même, représentée par le poids de l'avant-bras. De plus, je suppose le temps égal dans les trois cas, temps représenté si l'on veut par la fraction de seconde nécessaire pour obtenir l'image chronophotographique.

Eh bien, si je ne puis comparer directement entre elles ces trois formes de la contraction du biceps, puisque j'ignore la valeur absolue de chacune, je n'en arriverai pas moins au résultat cherché, si je les compare à une autre force toujours semblable à elle-même. Cette autre force est toute trouvée, c'est la pesanteur qui agit à l'autre extrémité du levier.

Or, dans le premier cas, il faut bien admettre que les deux forces sont égales.

Donc : contraction statique = P.

Dans le second cas, puisqu'il y a flexion, l'action musculaire l'emporte sur la pesanteur.

Donc : contraction dynamique avec travail positif > P.

Dans le troisième cas, la contraction musculaire le cède à la pesanteur, puisqu'il y a extension.

Donc : contraction dynamique avec travail négatif < P.

D'où nous pouvons conclure que l'effort statique est plus petit que l'effort dynamique avec travail positif et plus grand que l'effort dynamique avec travail négatif. Et si nous comparons entre eux les deux efforts dynamiques, nous conclurons que l'effort avec travail positif est plus grand que l'effort avec travail négatif.

L'examen de nos photographies instantanées confirme cette vue de l'esprit. Tout en constatant que, dans les deux cas, la forme générale du muscle est la même, on observe une différence dans le degré d'accentuation de cette forme.

Sur les deux photographies de la figure 142 (III et IV), qui représentent la flexion et l'extension de l'avant-bras avec un poids dans la main, il est bien évident que le biceps du membre qui se fléchit forme un relief plus isolé, souligné par une ombre plus forte que le relief du biceps du membre qui s'étend. La saillie générale du muscle est la même dans les deux cas, mais, dans l'extension, le relief du biceps se confond avec celui des parties voisines, tandis que, dans la flexion, il en est séparé par un sillon qui indique clairement une tension plus accentuée du muscle.

Nous ajouterons que ces différences de valeur entre les diverses formes de la contraction varient certainement avec la vitesse du mouvement exécuté. Plus le mouvement sera lent, plus ces différences s'atténueront ; elles s'accentueront au contraire avec la rapidité du mouvement.

En effet, si le mouvement de flexion et d'extension de l'avant-bras s'exécute très lentement, les deux efforts dynamiques, à la montée et à la descente, tendent à se rapprocher de l'effort statique sans toutefois y atteindre jamais, du moins théoriquement, tant que le mouvement existe.

Lorsqu'au contraire le mouvement augmente de rapidité, l'effort du muscle qui retarde la chute du membre est d'autant moindre qu'il la retarde moins, c'est-à-dire que le mouvement du membre se rapproche davantage de celui que lui imprimerait la seule action de la pesanteur. Il en résulte que, dans ces circonstances, les différences ne peuvent que s'accentuer entre les deux formes de la contraction dynamique.

Nous pouvons donc conclure que les *images d'un membre qui s'étend différeront d'autant plus de celles du même membre qui se fléchit que la rapidité du mouvement sera plus grande.*

L'expérience nous montre, en effet, que, dans les mouvements très rapides, l'opposition est complète entre le membre qui se fléchit et le membre qui s'étend. Les photographies (fig. 142, V et VI) sont parfaitement concluantes. Dans la flexion, le biceps forme un relief qui n'existe plus dans l'extension.

Je sais bien qu'alors le biceps est inactif au moment de l'extension et qu'il ne saurait plus être question de contraction frénatrice. Aussi je ne rappelle ce

cas que pour montrer le point extrême vers lequel tend la contraction frénatrice du biceps, alors qu'augmente la vitesse de l'extension de l'avant-bras sur le bras.

Aux formes de contraction déjà étudiées, il nous faut en ajouter une autre, que nous avons désignée sous le nom de *contraction balistique* et qui se rencontre très fréquemment dans le jeu de la machine humaine. Elle consiste en ce qu'elle se produit très énergiquement et très brusquement sur un muscle en état de distension, qu'elle dure très peu de temps, et qu'elle cesse brusquement et complètement bien avant que le mouvement du levier osseux qu'elle actionne ne soit terminé. Ce mouvement, sous l'impulsion quasi explosive du muscle, ne s'accomplit et ne s'achève qu'en vertu de la vitesse acquise et de l'inertie des parties mises en mouvement, de même qu'une pierre qu'on lance dans l'espace y décrit seule une certaine trajectoire. Cette forme de contraction est suivie du relâchement du muscle le plus complet, et va à l'encontre de l'erreur généralement répandue du muscle perpétuellement tendu.

Elle se rencontre sur le triceps fémoral à un certain moment de la marche, comme nous le verrons plus loin, dans l'acte de donner un coup de poing, dans celui de donner un coup de pied, etc.

On nous permettra de citer ici ce dernier exemple, parce que la contraction balistique s'y montre avec des caractères particulièrement sai-


A


B


C


D

Fig. 144. — Chronophotographie d'un coup de pied (Cliché A. Londe).

sissants (1). La figure 144 représente quatre attitudes successives d'une série chronophotographique d'un homme donnant un coup de pied. En A et en B, le muscle triceps distendu par la flexion de la jambe est en même temps vigoureusement contracté ainsi que le montre l'accentuation du dessin des différents faisceaux dont il se compose. En C et D, la jambe vivement lancée en avant arrive à l'extension. Pendant que A et B nous montrent une action musculaire énergique, C et D nous offrent l'exemple d'un relâchement musculaire complet se présentant sous deux aspects différents, mais non moins caractéristiques. C'est d'abord un gonflement énorme de toute la partie antérieure de la cuisse, suivi bientôt d'un aplatissement aussi complet que possible.

C'est dans les instants qui précèdent l'extension complète de la jambe sur la cuisse que nous observons le gonflement. Cette saillie exagérée est d'un modelé uniforme, ne ressemblant en rien au relief occasionné par la contraction dont les principaux caractères sont l'accentuation des différents faisceaux musculaires et les dépressions au niveau de l'insertion des fibres charnues sur les tendons, ainsi que nous l'avons exposé plus haut. Ici, rien de semblable, et cette saillie, beaucoup plus considérable d'ailleurs que celle due à la contraction, dont la surface ne révèle aucun des détails de la structure du muscle, ne peut être occasionnée que par le soulèvement en masse du muscle relâché, projeté en avant pour ainsi dire, comme un corps inerte, par le mouvement même imprimé au membre. S'il restait encore un doute, il suffirait de comparer la photographie C à la figure 145, choisie également au milieu d'une série chronophotographique représentant le même sujet étendant lentement la jambe sur la cuisse, celle-ci étant maintenue horizontale. On y voit le muscle quadriceps présentant tous les signes morphologiques d'une vigoureuse contraction.

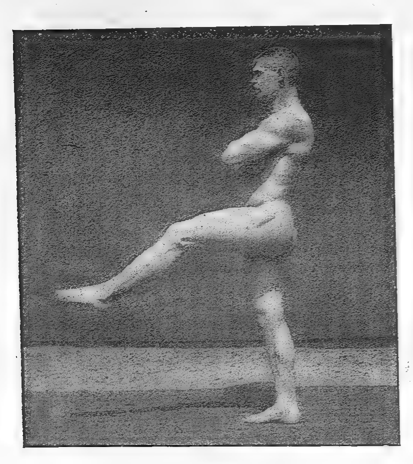


Fig. 145.

Puis, l'instant d'après, c'est-à-dire lorsque l'extension de la jambe est complète, toute cette masse retombe sous l'influence de la pesanteur, et c'est alors que l'aplatissement se produit. Nous voyons donc qu'au moment où la jambe approche de l'extension, le muscle quadriceps, qui a été la cause première de cette extension, est complètement relâché et n'est plus pour rien dans le mouvement qui s'achève sans lui.

Dans tout exercice qui consiste à lancer une balle avec le pied ou avec la main, comme dans le jeu du foot-ball ou de la longue paume, la contraction balistique intervient. Elle lance pour ainsi dire le membre, qui ne reçoit le

(1) Paul Richer, Note sur la contraction du muscle quadriceps dans l'acte de donner un coup de pied (*Société de biologie*, 23 mars 1895).

choc de la balle que lorsqu'il est déjà réduit lui-même à l'état de masse inerte. Les habitués eux-mêmes témoignent de ce mécanisme spécial, et pendant que les novices lancent la balle en contractant leurs muscles pendant tout le temps de l'action, eux se rendent très bien compte qu'ils n'acquièrent une sérieuse habileté que lorsqu'ils sont arrivés à donner un effort très énergique et très court seulement au commencement de l'action.

Contraction brusque et contraction lente des muscles striés. — Il est une découverte de M. Ranvier que les physiologistes n'ont point encore songé à appliquer à l'étude de la mécanique animale, et qui me semble cependant du plus haut intérêt.

M. Ranvier a observé que les muscles des membres chez le lapin ne présentaient pas tous le même aspect. La plupart sont blancs, translucides, par exemple les adducteurs de la cuisse et les jumeaux; les autres sont rouges, par exemple le demi-tendineux et le soléaire. Or ces deux sortes de muscles ont des propriétés physiologiques différentes et ne se contractent pas de la même façon.

Qu'ils soient excités directement ou par l'intermédiaire de leurs nerfs, les muscles rouges ont une contraction lente, qui met du temps à s'établir, dure quelques instants et ne cesse que graduellement. Les muscles blancs, au contraire, se contractent brusquement. Leur contraction est rapide, survenant tout d'un coup et cessant de même. Pour qui a assisté à l'expérience, l'opposition est saisissante entre ces deux formes de la contraction.

Ces différences physiologiques correspondent à des différences de structure, bien que muscles blancs et muscles rouges soient également des muscles striés.

La différence capitale consiste dans l'augmentation des disques élastiques chez les muscles rouges. Ce caractère, joint à d'autres détails de structure histologique sur lesquels nous n'avons pas à insister ici, ont permis à M. Ranvier de reconnaître, chez les muscles du lièvre, tous également rouges, les deux sortes de muscles, muscles à contraction lente et muscles à contraction brusque. La coloration n'est donc pour rien dans ces différences physiologiques qui reposent entièrement sur des différences de structure.

M. Ranvier expose de la façon suivante le mécanisme de la contraction lente chez les muscles rouges où domine l'élément élastique :

« Lorsque la contraction se produira dans un muscle rouge, c'est-à-dire lorsque les disques épais changeront de forme et diminueront de hauteur pour produire le raccourcissement, leur action s'exercera d'abord sur ces intermédiaires (disques blancs élastiques), et, comme ils sont très élastiques, ils céderont à la traction exercée et s'allongeront.

« Le raccourcissement du muscle sera diminué d'autant à son début. Mais ensuite, leur élasticité étant mise en jeu, ces parties restitueront la force qu'elles avaient absorbée, et, se raccourcissant à leur tour, continueront à diminuer la longueur du muscle. C'est pour cela qu'un muscle rouge, excité par une série de secousses d'un courant d'induction (10 à 20 par seconde, par exemple), se contracte peu à peu et sans interruption jusqu'à son maximum de raccourcissement, les parties élastiques servant d'intermédiaires

pour emmagasiner en quelque sorte la force de contraction, tandis que, dans les muscles blancs, où ces parties sont moins élastiques, chaque secousse produit une contraction brusque suivie de décontraction (1). »

Il est plus que vraisemblable d'admettre que les mêmes différences physiologiques se rencontrent chez les muscles rouges de l'homme, et qu'il doit exister, suivant la fonction qui leur est plus particulièrement dévolue, des muscles plus ou moins élastiques, c'est-à-dire des muscles à contraction brusque et des muscles à contraction lente.

Nous avons tout lieu de supposer que la contraction balistique, par exemple, ne saurait se rencontrer que chez des muscles peu élastiques, à contraction brusque.

D'autre part, il est un muscle que l'on pourrait appeler le muscle de la station verticale, ainsi que nous l'établirons plus loin ; c'est le muscle soléaire. Nos prévisions nous portent à croire que, dans ce muscle, la partie élastique prédomine et, qu'en conséquence, ce doit être un muscle à contraction lente. Je ne vois d'ailleurs, dans tous les mouvements de l'homme, aucune circonstance dans laquelle le soléaire doive être le siège d'une contraction brusque et courte. Ses fonctions en font, à proprement parler, un muscle équilibrateur, ainsi que M. Ranvier désigne les muscles rouges.

Par contre, le triceps crural, dont nous démontrerons plus loin le rôle dans la marche, et qui est fréquemment le siège de la contraction balistique, doit être un muscle peu élastique et à contraction brusque. On voit qu'il y a là tout un domaine encore inexploré et qui mérite d'attirer l'attention des physiologistes et des chercheurs.

Du jeu des antagonistes. — Que se passe-t-il pendant la contraction d'un groupe musculaire dans le groupe antagoniste ? D'après la doctrine classique, quand un muscle se contracte, un fléchisseur, par exemple, le muscle est inactif; il se laisse tout simplement allonger et n'oppose d'autre résistance que celle de son élasticité. Malheureusement, les choses ne sont pas aussi simples que cela. Quelques auteurs, et en particulier M. Beaunis, ont démontré que, dans la plupart des cas, les muscles antagonistes se contractent simultanément et que le mouvement produit est la résultante des contractions qui se produisent simultanément dans les muscles antagonistes.

Sans entrer dans le détail des expériences sur les animaux entreprises par M. Beaunis dans le but d'élucider cette intéressante question, je donnerai les conclusions auxquelles est arrivé cet auteur.

Trois cas peuvent se présenter :

1° Les deux muscles (ou groupes de muscles) antagonistes se contractent simultanément : c'est le cas le plus habituel, le type normal ;

2° Un seul des muscles se contracte, l'autre reste immobile : c'est l'exception ;

3° Un des muscles se contracte, le muscle antagoniste se relâche et s'allonge.

Ces faits expérimentaux, observés sur des muscles dénudés et détachés par une de leurs extrémités pour être mis en rapport avec un appareil enregistreur, sont interprétés comme il suit par M. Beaunis.

(1) Ranvier, *Traité technique d'histologie*, p. 496.

Inutile de parler du second cas, dans lequel un des muscles reste immobile : le mouvement étant produit par la contraction d'un seul muscle, il n'y a besoin d'aucune explication.

Dans le premier cas, lorsque les deux muscles antagonistes se contractent simultanément, le mouvement n'aura lieu que si les deux contractions ne sont point égales. Il se produira alors dans le sens de la contraction la plus forte, et son étendue sera proportionnelle à la différence des deux contractions.

Dans le troisième cas, contraction d'un côté et relâchement de l'autre, le résultat est tout différent. Les actions musculaires, loin de se détruire, s'ajoutent l'une à l'autre, puisqu'elles entraînent le membre dans le même sens. La résultante, au lieu d'être une différence, est la somme des deux actions musculaires. Mais il ne faut pas oublier que toutes les expériences ont porté sur les animaux et sur des muscles n'ayant plus leurs connexions physiologiques. Il était intéressant de rechercher dans quelle mesure ces différents modes de réagir des antagonistes peuvent s'observer chez l'homme dans le jeu régulier des divers mouvements. Nous verrons que nos observations confirment, au moins en partie, les expériences de M. Beaunis.

Considérons à nouveau un mouvement très simple, la flexion de l'avant-bras sur le bras.

Dans le mouvement lent, la main n'étant chargée d'aucun poids, on remarque, lors de la flexion, un certain relief du triceps, qui est le muscle extenseur, relief qui peut faire croire à un certain degré de contraction de ce muscle, qui est le muscle antagoniste. Nous serions ici dans le premier cas de M. Beaunis, cas dans lequel les deux muscles antagonistes entreraient à la fois en contraction, l'un pour exécuter le mouvement, l'autre pour le modérer. Le résultat obtenu est une différence, suivant la théorie parfaitement juste de M. Beaunis. L'effort du muscle fléchisseur, dans ce cas, se trouve partiellement annihilé par la résistance active du muscle antagoniste contracté.

Cette contraction de l'antagoniste, toute faible qu'elle soit, paraît évidente sur nos séries chronophotographiques (fig. 142, I). Si l'on compare l'image du membre qui se fléchit à l'image du membre soutenu et maintenu immobile dans la même position, on voit, dans ce dernier cas, un relâchement évident se produire, non seulement dans le biceps, dont l'action devient inutile, mais aussi dans le triceps. L'expérience suivante, très facile à répéter, montre de la manière la plus évidente la contraction simultanée des muscles antagonistes. Nous prions le modèle de laisser son membre inerte pendant que nous soulevons son avant-bras jusqu'à ce qu'il forme un angle droit avec le bras : nous constatons que le biceps reste dans le relâchement et que le triceps est légèrement distendu. Mais si nous abandonnons le membre tout d'un coup en priant le modèle de conserver la position, on voit très nettement le triceps se contracter en même temps que le biceps.

Si, maintenant, nous comparons l'image du membre qui se fléchit à celle du membre qui s'étend, nous constatons que le triceps est moins contracté dans le second cas que dans le premier (fig. 142, I et II), fait de prime abord para-

doxal, puisque le triceps est le muscle extenseur, mais qui se comprend si l'on songe que, dans ce cas (mouvement lent), le muscle actif dans l'extension est encore le fléchisseur dont la contraction n'a plus besoin de la modération de son antagoniste.

On peut constater également que, lorsque la contraction du biceps augmente d'intensité, la contraction du triceps augmente également. Sur un membre qui soulève en se fléchissant un poids très lourd, le corps charnu du triceps est plus ramassé que dans le même mouvement de flexion à vide, ce qui indique un état de contraction plus marquée dans le premier cas que dans le second (fig. 142, I et III).

Passons maintenant à l'étude fort curieuse de ce qui se passe dans les mêmes mouvements de flexion et d'extension de l'avant-bras sur le bras exécutés très rapidement et sans s'arrêter un certain nombre de fois de suite. Nous allons avoir là la démonstration très nette de cette forme spéciale de la contraction musculaire que nous avons désignée du nom de *contraction balistique*.

Nous voyons alors les muscles antagonistes — je considère particulièrement alors le biceps et le triceps — se contracter fort énergiquement à tour de rôle pour entraîner le membre alternativement chacun de son côté, et en même temps nous constatons que chacun des muscles cesse son action subitement avant que le membre ait achevé son mouvement qui se continue en vertu de la seule inertie des parties.

Ainsi, prenons le membre au moment où il est étendu; le biceps se contracte alors fort énergiquement et sa contraction persiste encore au moment où le membre passe à l'angle droit, mais, arrivé au point extrême de la flexion, le muscle biceps est complètement relâché. La comparaison des deux photographies III et V de la figure 143 est instructive. Toutes les deux sont prises sur le membre en mouvement; sur l'une (V) le membre se meut lentement, sur l'autre (III) il se meut très vite. Sur la première, le relief du biceps est énorme. Sur la seconde, le biceps est comme aplati.

A partir de ce moment, l'avant-bras s'étend alors sous l'influence d'une contraction énergique du triceps nullement entravé par le biceps qui est complètement relâché (ce qui n'a pas lieu dans le mouvement lent). Mais avant que le membre arrive à l'extension, le triceps est déjà relâché et la photographie IV de la figure 143, prise pendant le mouvement très rapide, nous montre un membre étendu à l'extrême avec un extenseur absolument flasque, ce qui n'a point lieu pour le mouvement lent (VI, fig. 143) sur lequel nous voyons le triceps contracté.

Ainsi donc, dans ce cas, l'avant-bras se trouve pour ainsi dire lancé dans les deux directions différentes par la contraction momentanée et alternative des deux muscles antagonistes, à la manière d'une balle que deux joueurs de paume se renvoient.

Nous pouvons retrouver ce jeu des antagonistes dans les diverses parties d'un même muscle, le deltoïde, lors de l'élévation d'un bras en dehors. Le fait est particulièrement saisissant et mérite que nous nous y arrêtions un instant.

L'élévation des bras en dehors est sous la dépendance du muscle deltoïde. Je

néglige pour le moment l'action synergique du grand dentelé. Mais le muscle ne concourt pas dans son entier à ce mouvement d'élévation : ses deux tiers antérieurs sont élévateurs, son tiers postérieur, au contraire, est abaisseur du bras ; ce dernier tiers est donc antagoniste de l'autre portion du muscle.

Que le membre s'élève ou s'abaisse, la main chargée d'un poids ou à vide, la forme du deltoïde ne change guère, et la contraction n'existe toujours que dans les deux tiers antérieurs. Sur des photographies instantanées qui représentent un homme abaissant un bras pendant que l'autre s'élève, et saisi juste au moment où les deux membres sont au même niveau, il est impossible de dire, d'après le seul examen morphologique des deux membres, lequel monte et lequel descend.

Si le membre, dans ce mouvement, au lieu de porter un poids, exerce une traction de haut en bas par l'intermédiaire d'une poulie placée en haut et d'une corde, les choses changent. Le muscle en jeu est l'abaisseur au lieu d'être l'élévateur, et c'est le tiers postérieur du deltoïde qu'on voit alors se contracter. La contraction est plus forte, cela va sans dire, dans l'abaissement que dans l'élévation du membre, car, dans ce dernier cas, le muscle ne fait que retenir le poids entraîné par la pesanteur ; c'est la contraction frénatrice dont l'effort est diminué par les frottements de la corde sur les poulies. Mais, dans les deux cas, la contraction est évidente.

Si, maintenant, nous considérons l'épaule du membre qui se meut très rapidement, nous voyons une opposition complète dans les formes, suivant que le membre monte ou descend. S'il monte, la contraction est aux deux tiers antérieurs du deltoïde ; s'il descend, elle est au tiers postérieur. Les photographies instantanées sont très démonstratives.

Dans ce cas, il nous sera donc très facile, sur l'image du membre saisi au milieu de son mouvement, de dire dans quel sens s'exécute ce mouvement.

De même, sur l'image du membre arrivé à son point extrême d'élévation, nous saurons s'il se meut lentement ou rapidement. Dans le premier cas, la contraction de la partie moyenne et antérieure du deltoïde se maintient, tandis que, dans le mouvement rapide, elle n'existe plus bien avant que le membre ait atteint la fin de sa course.

C'est encore là un exemple de contraction balistique qui lance le membre dans une direction et cesse bien avant que le membre ait achevé son mouvement.

Nous venons de constater dans le mouvement rapide, sur le bras qui monte, un relâchement du deltoïde bien avant que ce membre ait atteint la verticale ; de même on peut constater, lorsque le membre est en bas près de la fin de sa course, un relâchement des abaisseurs (grand pectoral en avant, tiers postérieur du deltoïde, grand rond, grand dorsal en arrière).

Nous pouvons, de ce qui précède, tirer quelques conclusions intéressantes :

A. — *Dans les mouvements lents, il faut distinguer deux cas :*

1° *Ceux qui s'exécutent dans un plan vertical ou plus ou moins oblique ;*

2° *Ceux qui se passent dans un plan horizontal.*

Les premiers sont influencés par la pesanteur ; dans les seconds, la pesanteur n'est pour rien.

Dans les premiers, quel que soit le sens du mouvement, l'action musculaire est dirigée toujours du même côté, du côté de l'effort à faire pour vaincre entièrement l'action de la pesanteur ou pour lui résister partiellement.

Exemples : dans la flexion ou l'extension de l'avant-bras sur le bras, celui-ci restant vertical, l'effort musculaire est toujours au biceps; dans la flexion du corps en avant ou dans son redressement, l'action musculaire est toujours aux extenseurs, spinaux et fessiers; dans l'élévation du bras en dehors ou dans son abaissement, l'action musculaire est toujours aux muscles élévateurs, deltoïde, grand dentelé; dans la flexion de la jambe sur la cuisse, celle-ci demeurant dans le voisinage de la verticale, et dans son extension, l'action musculaire est toujours aux fléchisseurs (muscles postérieurs de la cuisse). Les choses changent si la cuisse fléchie sur le bassin est maintenue horizontale. Dans ce cas, l'extension de la jambe est produite par l'extenseur triceps fémoral, qui entre encore en contraction dans le mouvement de la jambe en sens inverse, etc., etc...

Dans tous ces cas, la forme du membre en action ne changera guère, quel que soit le sens du mouvement.

Dans la deuxième série des mouvements lents, ceux qui se passent dans le plan horizontal, les choses changent complètement et l'action musculaire se produit du côté même où s'effectue le mouvement. Exemple : si le membre supérieur, étendu horizontalement en dehors, est mû alternativement en avant et en arrière, ce sont des muscles différents qui entreront en action dans les deux mouvements : muscles situés en avant de l'épaule (tiers antérieur du deltoïde, partie supérieure du grand pectoral) pour le mouvement en avant, muscles situés en arrière (tiers postérieur du deltoïde) pour le mouvement en ce sens.

Les mouvements de rotation des membres sur leur axe obéissent aux mêmes lois. La rotation en dehors s'obtient par l'action d'autres muscles que la rotation en dedans.

Dans les mouvements lents, j'ajouterai que les antagonistes du mouvement sont généralement légèrement contractés.

B. — *Dans les mouvements très rapides, il n'y a pas de categorie à établir; dans tous ces cas, les choses se passent comme dans les mouvements qui ne sont pas influencés par la pesanteur. L'action musculaire existe toujours du côté du sens du mouvement*, par exemple dans les fléchisseurs lors de la flexion, dans les extenseurs lors de l'extension, et les muscles antagonistes sont manifestement relâchés.

Dans ce cas, la forme du membre est telle qu'à la seule inspection de l'image on peut déduire le sens dans lequel le membre se meut.

II. — DE LA STATION

On désigne généralement sous le nom de *station* les manières les plus simples de se tenir au repos sans que le corps soit complètement abandonné à l'action de la pesanteur. Le décubitus, par exemple, n'est pas un état de sta-

tion. Il en résulte que toute station est un acte de résistance aux lois de la pesanteur. Cette résistance est passive en ce qui concerne les os et les ligaments : elle est active lorsqu'elle nécessite, en outre, l'intervention de la force musculaire.

En général, les attitudes de station les plus usuelles, qui sont en même temps des attitudes de repos, sont combinées, au point de vue mécanique, de telle façon que les résistances passives, os et ligaments, y prennent une part prépondérante et que l'action musculaire, cause de dépenses physiologiques, et par suite de fatigue, y soit économisée le plus possible.

Nous étudierons successivement : la station verticale droite ou symétrique, et accessoirement la station sur la pointe des pieds; la station verticale hanchée ou asymétrique; la station à genoux ; la station assise.

A. — STATION VERTICALE DROITE OU SYMÉTRIQUE

Dans cette station, l'homme est debout, portant également sur les deux jambes, qui sont en extension. Les pieds, qui se touchent par le talon, s'écartent en avant. Le torse est droit, les membres supérieurs retombant naturellement de chaque côté du corps. La face est verticale, l'œil dirigé à l'horizon.

Bien que cette attitude soit rarement prise par l'homme livré à lui-même, avec la correction que nous venons d'indiquer, son étude n'en est pas moins de la plus haute importance. Car elle est, pour ainsi dire, le type de toute station et son mécanisme donne la clef de la plupart des problèmes que soulève l'équilibre du corps humain. Ces remarques justifient les détails dans lesquels nous allons entrer à son sujet.

Mécanisme.

Le corps humain, composé de différents segments articulés les uns avec les autres, ne peut se tenir droit qu'aux conditions suivantes : 1° il faut que ces différents segments offrent une résistance suffisante pour pouvoir être soutenus et supportés les uns par les autres ; 2° il faut ensuite qu'ils soient maintenus dans un état d'extension réciproque ; 3° il faut enfin que le centre de gravité passe par la base de sustentation.

1° ***Résistance des différents segments du corps.*** — La colonne vertébrale porte la tête et soutient le poids des parties suspendues autour d'elle. Mais elle subit de ce fait une sorte de compression dans le sens vertical, d'où résulte que l'homme est toujours moins grand debout que lorsqu'il est couché. Les courbures de la colonne vertébrale augmentent sa résistance et, au lieu de résister comme 1, elle résiste comme le carré du nombre de ses courbures plus un. Mais on ne peut pas dire que sa résistance est encore augmentée par le canal dont elle est intérieurement creusée. Le principe de mécanique qui montre qu'une colonne creuse résiste plus qu'une colonne massive composée de la même quantité de matière, tout étant égal d'ailleurs, ne saurait trouver son application ici, — il suffit de faire remarquer que la colonne de soutien est exclusivement formée par la succession des corps ver-

tébraux et que le canal central n'est pas creusé au milieu, mais en arrière d'eux, — tandis qu'il est parfaitement applicable aux os longs des membres.

Le sacrum, sur lequel repose la colonne vertébrale, est solidement fixé dans les symphyses iliaques, aux os coxaux, qui, reliés entre eux en avant par la symphyse pubienne, forment avec lui une ceinture osseuse résistante, par l'intermédiaire de laquelle le poids du tronc, avec celui de la tête et des bras, se transmet aux membres inférieurs. La forme de coin à base inférieure du sacrum a pour résultat de répartir la pression sur toutes les parties du cercle pelvien.

Les fémurs résistent à la pression du bassin à la manière des colonnes creuses et transmettent le poids des parties supérieures aux tibias. Enfin, les tibias soutiennent les fémurs, et tout l'édifice repose, en dernière analyse, sur les os du pied. Le squelette du pied est formé d'os nombreux disposés à la manière d'une voûte dont l'appui postérieur est au calcanéum, et l'appui antérieur aux têtes des métatarsiens. Le bord externe de la voûte repose également sur le sol. C'est par son sommet, représenté par l'astragale, que cette voûte supporte tout le poids du corps.

2° ***Extension des différents segments du corps les uns sur les autres.*** — La plus ancienne théorie qui cherche à expliquer cette extension est la théorie musculaire, émise par Fabrice d'Aquapendente. Elle admet que le redressement des divers segments du corps, dans la station debout, ne peut être maintenu que par la contraction incessante des groupes musculaires antagonistes et, en particulier, des extenseurs.

En 1846, les frères Weber imaginèrent la théorie mécanique qui fait jouer un rôle capital à la distension des ligaments de l'articulation de la hanche et du genou. Enfin, il est une troisième théorie, celle de M. Giraud-Teulon, qui se rapproche de cette dernière, mais remplace la distension ligamenteuse par la tonicité musculaire.

Ces deux dernières théories ont ceci de commun, qu'elles suppriment, dans la station droite, toute action des muscles sacro-lombaires, fessiers et triceps fémoraux. C'est là un point capital et qui nous semble définitivement acquis, ainsi que nous le démontrerons à l'aide de preuves nouvelles tirées de l'examen du nu.

Sur les autres points, distension ligamenteuse ou tonicité musculaire, nous faisons nos réserves, disposé que nous sommes à les accepter, suivant les régions, soit l'une à l'exclusion de l'autre, soit les deux à la fois.

Nous ferons observer néanmoins qu'à la place de la tonicité ou contractilité musculaire tonique, admise par Giraud-Teulon, nous admettons un état de distension du muscle avec contraction que nous avons désigné sous le nom de *distension active.*

3° ***Conditions d'équilibre des différents segments du corps les uns sur les autres.*** — Nous examinerons successivement la station des différents segments du corps les uns sur les autres.

a. Station de la tête sur la colonne vertébrale. — La tête repose sur l'atlas dont les surfaces articulaires supérieures forment son centre d'appui. Lorsque le visage est vertical, la ligne de gravité qui part du centre de gravité

de la tête passe un peu en avant de l'articulation occipito-atloïdienne. D'où il suit que la tête tomberait en avant si elle n'en était empêchée par les muscles de la nuque qui, résistant à l'éloignement de leurs points d'attache, sont dans cet état d'activité spéciale que je désigne sous le nom de distension active. Le système représente alors un levier du premier genre dont le point d'appui est au centre, la résistance en avant et la puissance en arrière. Mais cette action des muscles de la nuque n'a pas besoin d'être énergique, car la ligne de gravité passant très peu en avant du centre d'appui, le bras de la résistance est fort court, et celui de la puissance le dépasse certainement en longueur. Il suffit de tourner le visage légèrement en haut pour que, la ligne de gravité passant par le point d'appui même, l'équilibre s'établisse sans le secours d'aucune force musculaire.

L'équilibre des diverses pièces de la colonne vertébrale se fait également suivant la théorie du levier du premier genre. Le point d'appui est au centre des corps vertébraux, la résistance est au centre de gravité du torse placé en avant d'eux, et la puissance dans les muscles du dos ou du cou qui empêchent la colonne d'être entraînée en avant.

Pour la colonne lombaire, les forces se déplacent, le point d'appui demeurant toujours au milieu au niveau des corps vertébraux ; la ligne de gravité du torse passe, en effet, en arrière des vertèbres lombaires, et constitue la résistance, pendant qu'en cette région la puissance qui fait équilibre à la pesanteur est en avant, aux muscles de l'abdomen ; d'où il résulte que les muscles lombaires, dans la station droite, n'ont rien à supporter. L'examen du nu confirme de la façon la plus décisive cette manière de voir. Il est, en effet, facile de s'assurer chez un sujet bien musclé que, dans cette attitude, les muscles abdominaux sont tendus, pendant que les muscles sacro-lombaires présentent les sillons transverses, indices manifestes de leur complet relâchement.

b. Station du tronc sur les cuisses. — Étant donnée la forme de « noix » des deux articulations coxo-fémorales, l'équilibre du tronc sur les fémurs est des plus précaires et ne peut être maintenu que grâce à des dispositions spéciales. Les partisans de la théorie musculaire font appel aux muscles puissants qui entourent ces articulations et pensent que le maintien de l'équilibre est assuré par la contraction simultanée des muscles antagonistes, la ligne de gravité passant par le plan même de l'articulation. Certains prétendent même que la ligne de gravité passe en avant de l'articulation et que tout l'effort est supporté par la contraction permanente des muscles fessiers, qui empêchent la chute en avant. C'est là une grossière erreur. Il suffit de regarder le nu pour constater que, dans la station droite, les muscles fessiers sont dans le relâchement le plus complet. En se reportant aux signes morphologiques que nous avons donnés des différents états physiologiques des muscles, la chose apparaîtra avec la dernière évidence.

Nous devons conclure de cette constatation que c'est en arrière de l'axe transverse qui joindrait le centre des deux articulations coxo-fémorales que passe la ligne de gravité du tronc, et que c'est en avant qu'il nous faut chercher le contrepoids. Ce contrepoids se trouve réalisé par la distension d'un

fort trousseau ligamenteux, le ligament de Bertin, d'après les frères Weber, et, d'après Giraud-Teulon, par la tonicité du muscle psoas-iliaque. Peut-être ces deux facteurs entrent-ils en jeu, et à la résistance passive du ligament faut-il joindre la résistance active du muscle psoas-iliaque qui, de par l'écartement de ses points d'attache, se trouve mis en état de distension. J'ajouterai qu'on pourrait y joindre l'action d'un autre muscle, le tenseur du *fascia lata* qui, dans la station droite, est aussi manifestement distendu.

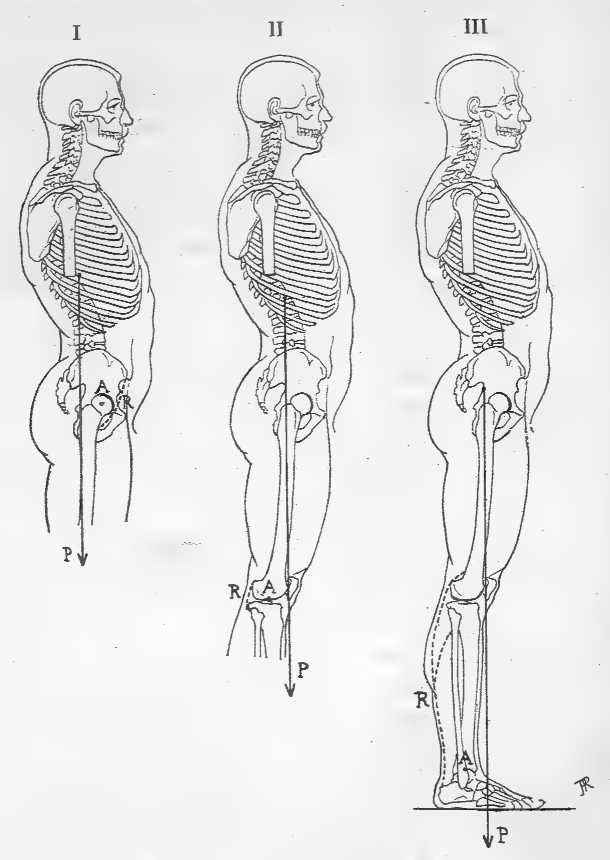


Fig. 146. — Équilibre des divers segments du corps les uns sur les autres dans la station droite. — I, station du tronc sur les cuisses. — II, station des cuisses sur les tibias. — III, station des jambes sur les pieds. — A, point d'appui au centre articulaire. — P, Ligne de gravité. — R, résistance ligamenteuse (I, II) ou musculaire (III).

L'équilibre du tronc sur les cuisses est ainsi assuré d'après le mécanisme d'un levier du premier genre dont le point d'appui est au centre articulaire, la puissance en arrière au point d'application du centre de gravité du tronc, et la résistance en avant représentée par les ligaments et les muscles distendus (fig. 146, I).

c. Station des cuisses sur les tibias. — Les deux fémurs reposent sur les plateaux des tibias. Si la ligne de gravité des parties situées au-dessus

passait au niveau ou en arrière de l'articulation du genou, la contraction énergique de l'extenseur de cette articulation (quadriceps) serait indispensable pour empêcher la flexion. Or l'examen du nu, d'après les règles que nous avons exposées (1), nous démontre péremptoirement que, dans la station droite, le quadriceps est dans un relâchement complet; il nous faut donc conclure que c'est en avant du centre articulaire que passe la ligne de gravité, et que, conformément à ce qui a lieu pour la hanche, le genou se trouve maintenu en extension par la seule action de la pesanteur, laquelle extension est limitée par la distension des ligaments articulaires et en particulier des ligaments croisés (fig. 146, II).

Il convient de faire intervenir également la distension active des masses musculaires des jumeaux. Ces muscles, dont les fibres charnues sont assez courtes, ne sont pas susceptibles d'un allongement considérable, et, dans la station droite, l'extension du genou les place dans un état de distension qui n'est pas éloigné de la limite de leur allongement. Comme nous verrons tout à l'heure qu'ils jouent un rôle actif et important dans le maintien de l'articulation du cou-de-pied, il paraît également évident qu'ils contribuent à limiter l'extension de l'articulation du genou.

d. STATION DES JAMBES SUR LES PIEDS. — L'articulation tibio-tarsienne ne possède aucun appareil ligamenteux qui puisse limiter ses mouvements, soit en avant, soit en arrière. Il en résulte que l'action musculaire seule peut, dans la station droite, fixer cette articulation.

En quoi consiste et où réside cette action musculaire ?

Nous verrons tout à l'heure que la ligne de gravité du corps passe bien en avant de l'articulation tibio-tarsienne ; c'est donc en arrière que se trouve la puissance qui empêchera la chute en avant et cette puissance ne saurait être ailleurs que dans le muscle gastrocnémien, et plus particulièrement dans le soléaire, puisque l'action des jumeaux est subordonnée à la position de l'articulation du genou. Le muscle soléaire est donc, à proprement parler, le muscle de la station verticale (fig. 146, III). A part les muscles de la nuque, c'est le seul muscle qui intervienne d'une façon active et nécessaire pour maintenir l'équilibre de la station. Ce rôle, autrefois dévolu aux muscles fessiers dont le volume en avait imposé aux physiologistes, doit être presque exclusivement attribué au soléaire. Ce muscle, et accessoirement les jumeaux, se trouve dans cet état physiologique spécial que nous désignons sous le nom de distension active ou de distension s'accompagnant de contraction. Il est distendu, car, si nous abandonnons le muscle à lui-même, nous verrons la pointe du pied s'abaisser, et l'angle ouvert en avant formé par l'axe de la jambe et l'axe du pied s'ouvrir notablement ; il est en même temps contracté, car cette distension n'atteint pas les limites extrêmes et se trouve arrêtée à mi-chemin par la contraction musculaire. C'est là une condition extrêmement favorable au travail musculaire et, si l'on veut comparer, au point de vue de la fatigue, la contraction musculaire avec raccourcissement à la contraction musculaire avec allongement qui est le cas actuel, il suffira de

(1) Voy. *Anatomie artistique*. Plon, édit., 1890.

comparer la station sur la pointe des pieds avec la station sur la plante : dans les deux cas, le muscle gastrocnémien accomplit le même travail : il fait équilibre au poids du corps ; mais, dans le premier cas, il est en contraction avec raccourcissement, tandis que, dans le second cas, il est en contraction avec allongement de ses fibres.

Le corps, dans la station verticale, n'est pas d'une immobilité parfaite : il subit des oscillations, minimes il est vrai, mais qu'il est facile de mettre en relief au moyen d'appareils enregistreurs. Ces oscillations sont surtout sensibles à l'extrémité supérieure du levier que représente l'homme debout, c'est-à-dire à la tête. On constate alors qu'elles sont beaucoup plus accentuées dans le sens antéro-postérieur que dans le sens latéral, où elles sont assez faibles. Les partisans de la théorie musculaire y voient une preuve de l'activité des muscles au niveau des différents segments du corps, activité destinée à les maintenir en équilibre les uns sur les autres. Nous avons montré comment l'action musculaire n'avait pas lieu d'intervenir pour maintenir l'extension de la hanche et du genou. Nous pensons donc que ces oscillations antéro-postérieures sont, pour la plus grande partie, la traduction de ce qui se passe dans le muscle du mollet en état de distension active.

e. Station des pieds sur le sol. — Les deux pieds circonscrivent la base de sustentation par laquelle doit passer la ligne de gravité de tout le corps pour qu'il y ait équilibre. Cette ligne passe, en supposant les deux moitiés latérales du corps d'égal poids, dans le plan sagittal médian : reste à trouver à quel niveau dans le sens antéro-postérieur. Nous avons tenté de le déterminer expérimentalement de la façon suivante (fig. 147) :

Nous prions un modèle, préalablement chaussé de sandales à semelles de bois parfaitement planes, de se tenir debout en équilibre sur la surface de section d'une planche verticale de 1 centimètre d'épaisseur et disposée transversalement par rapport à lui. Un fil à plomb est installé à demeure sur le côté du sujet, de manière qu'il rencontre la section de la planche. Enfin, l'observateur se place à une certaine distance sur le prolongement de cette même planche et voit ainsi le sujet en expérience de profil, traversé par la verticale du fil à plomb.

L'expérience comporte plusieurs temps. Le sujet est invité à se tenir en équilibre sur les deux pieds placés comme dans la station droite, en prenant contact avec la planche successivement par différents points de la longueur de la semelle, de la pointe au talon (fig. 147, *1*, *2*, *3*). Chaque fois que l'équilibre est bien établi, une photographie est faite; je n'ai pas besoin d'ajouter que l'objectif se trouve exactement sur le prolongement de la planche verticale qui sert à l'expérience, c'est-à-dire perpendiculairement au plan médian sagittal du sujet.

En dernier lieu, le sujet est photographié dans la station debout à la même place, mais reposant alors sur une large surface parfaitement horizontale (fig. 147, *4*).

Or la solution du problème est tout entière dans les diverses photographies ainsi obtenues.

Dans la première, le modèle repose sur la pointe des pieds. On voit que,

pour maintenir l'équilibre, le corps est forcé de se pencher en avant et l'attitude ne ressemble en rien à celle de la station droite.

Dans la deuxième, le modèle repose sur les talons, et la direction que prennent alors les membres inférieurs diffère considérablement de celle qui est propre à ce mode de station.

Dans la troisième, au contraire, le modèle repose sur le milieu de la semelle et toute l'attitude se rapproche de celle de la station droite normale bien équilibrée, ainsi que le confirme la quatrième photographie qui représente le même sujet reposant sur un large plan résistant.

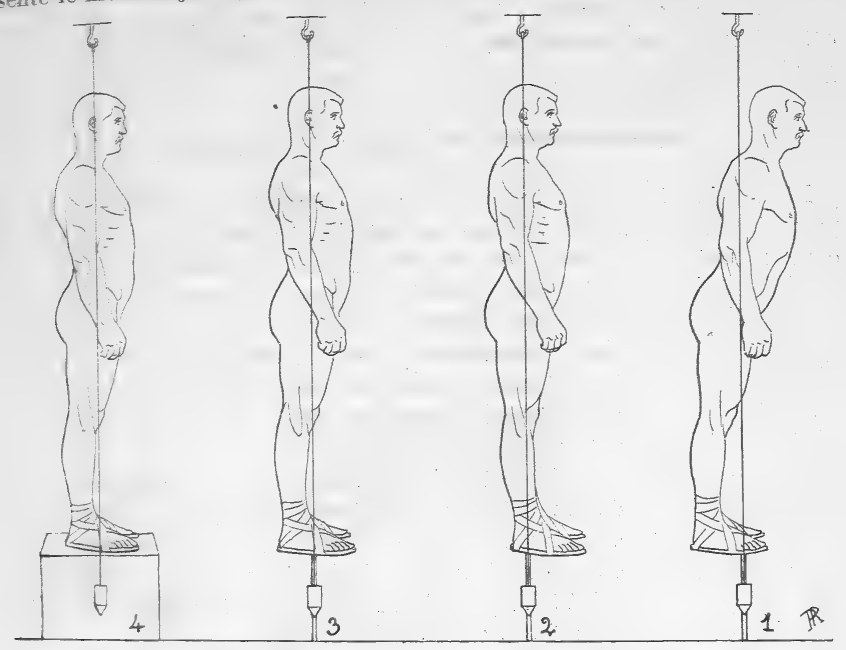


Fig. 147. — Détermination expérimentale du centre de gravité dans la station droite.

Il est bien évident que le centre de gravité est contenu dans le plan vertical latéro-latéral qui passe par la section de la planche et qui est tracé sur les photographies par le fil à plomb.

On peut donc conclure de l'examen des photographies en question que, *dans la station droite, la ligne de gravité passe bien en avant de l'articulation tibio-tarsienne, dans un plan transversal situé en avant de l'apophyse du cinquième métatarsien*. Prolongée par en haut, cette ligne passe en avant du moignon de l'épaule et traverse le pavillon de l'oreille vers son milieu.

Cette ligne de gravité peut subir des déplacements variés dans les mouvements sur place. Le tronc peut incliner en tous sens d'une certaine quantité sans que l'équilibre soit détruit. Si les pieds sont écartés l'un de l'autre, la base de sustentation est élargie et le tronc peut subir des déplacements beaucoup plus étendus dans le sens de l'écartement des pieds.

Si l'homme ajoute à son propre poids des poids étrangers, s'il porte des fardeaux, par exemple, il est obligé de prendre certaines attitudes caractéristiques et nécessitées par le maintien de l'équilibre qui ne peut exister que si le centre de gravité du corps, calculé avec le poids additionnel, est dans une verticale passant par la base de sustentation.

Si la charge est portée en arrière sur le dos, le tronc se penche en avant. Si elle est en avant, dans un éventaire, par exemple, ou bien lorsque des haltères sont maintenus au bout des bras horizontalement tendus en avant, le corps prend une attitude opposée. L'homme qui porte un fardeau à la main se renverse de côté pour le même motif; de plus, il étend souvent le bras du côté où il penche pour accentuer davantage le déplacement du centre de gravité.

Aplombs du corps dans la station droite.

En examinant le profil d'un homme qui se tient dans la station droite, on peut constater à première vue que les différents segments dont se compose le corps et dont nous avons étudié plus haut le mode d'équilibre, ne se trouvent point superposés les uns sur les autres de manière que l'axe longitudinal de chacun d'eux se confonde avec la même verticale. Ils sont tous, au contraire, plus ou moins inclinés les uns sur les autres, de telle sorte que leurs axes décrivent une ligne brisée intéressante à bien connaître (fig. 148).

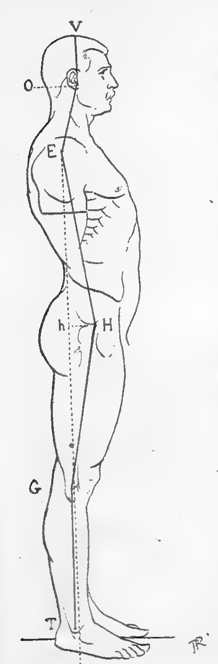


Fig. 148. — Aplomb du corps dans la station droite.

La ligne transversale qui joint les centres articulaires des deux épaules perce le profil en un point qui se trouve situé au milieu d'une ligne horizontale passant par la deuxième pièce sternale (E). Une verticale tracée de ce point tombe sur l'articulation tibio-tarsienne en avant de la malléole externe.

L'axe des hanches est toujours situé dans un plan antérieur à l'axe des épaules. Sur le profil, cet axe se projette en un point situé en avant et au-dessus du grand trochanter (H).

La distance qui sépare les deux plans verticaux passant par l'axe des épaules et par celui des hanches peut être mesurée par la perpendiculaire menée du point de la hanche sur la verticale abaissée du point des épaules (Hh).

Chez un homme de taille moyenne de 1^{m},65, cette perpendiculaire a 7 à 8 centimètres de longueur. Cette distance varie avec les individus et elle décroît en même temps que diminue la courbure des reins. Je n'ai observé chez aucun sujet sain cette distance réduite à zéro, c'est-à-dire l'axe des épaules et des reins passant par le même plan vertical.

Cette distance augmente chez les sujets qui se cambrent, exagèrent le

redressement de leur taille. Sur un même sujet, elle augmente s'il porte les mains en avant, et plus encore si les mains sont chargées de poids.

Une ligne tracée du centre des hanches au centre des épaules peut être considérée comme l'axe du tronc; du centre des hanches au centre de l'articulation fémoro-tibiale (G), une autre ligne représentera l'axe de la cuisse et du genou à l'articulation tibio-tarsienne (T); une troisième ligne figurera l'axe de la jambe. Du centre des épaules au centre d'articulation de la tête et du cou (O), une quatrième ligne formera l'axe du cou. Et de ce dernier point, une verticale s'élevant jusqu'au vertex (V) sera considérée comme représentant l'axe de la tête.

Ces cinq lignes, représentant les axes des différents segments du corps dans la station droite, se succèdent en s'inclinant les unes sur les autres de la façon suivante :

De l'axe de la tête, qui est vertical, l'axe du cou se dirige en arrière, puis l'axe du tronc se porte en avant et enfin l'axe des membres inférieurs se dirige à son tour en arrière, formant au niveau du genou un angle ouvert en avant.

En résumé, nous pouvons dire que la station verticale se compose d'une succession de lignes alternativement de sens inverse. Les angles formés par ces différentes lignes sont des angles obtus très ouverts. Les angles peuvent varier légèrement suivant la tenue du sujet. S'ils se ferment, le sujet portant le menton et le ventre en avant, la taille totale diminuera ; s'ils s'ouvrent au contraire davantage par des mouvements inverses, la taille augmentera. Voilà pourquoi la mesure de la taille exige certaines précautions pour être prise avec rigueur. Il faut placer ces différentes lignes brisées dans une situation fixe et toujours la même. Ce résultat s'obtient en accolant le sujet à un plan vertical, à un mur auquel il touchera de la tête, des épaules, des fesses et des talons.

B. — STATION SUR LA POINTE DES PIEDS

La théorie classique veut que, dans l'acte de se soulever sur la pointe des pieds, le pied représente un levier du deuxième genre dont les exemples sont fort rares dans l'économie. La puissance se trouverait en arrière appliquée au talon et représentée par le triceps sural, le point d'appui en avant au niveau des orteils pressant sur le sol, et la résistance au milieu de l'articulation tibio-tarsienne même, supportant le poids du corps.

Cette doctrine a été vivement combattue dans ces derniers temps par MM. Imbert et Bédart (de Toulouse). Ces auteurs prétendent que, dans la station sur les orteils, le pied représente un levier du premier genre dont la puissance se trouve en arrière au point d'insertion du triceps sural au calcanéum, la résistance représentée par la ligne de gravité du corps au niveau de la nouvelle base de sustentation formée par les doigts du pied, et le centre de rotation au milieu dans l'articulation tibio-tarsienne. La vérité est que le mouvement de soulèvement sur la pointe des pieds peut s'exécuter d'après ces différents mécanismes suivant la position de la ligne de gravité, mais

qu'il n'existe de stabilité que dans le mouvement exécuté d'après le mécanisme du levier du premier genre. Il n'est pas sans intérêt de faire remarquer que c'est d'après le même mécanisme qu'a lieu la station droite, puisque la ligne de gravité passe bien en avant de l'articulation tibio-tarsienne. Lorsque la position sur la pointe des pieds est réalisée, il est bien clair, puisqu'il y a équilibre, que la ligne de gravité passe par la nouvelle base de sustentation, mais au moment où le mouvement va s'exécuter, qu'arrive-t-il ?

Il est facile de démontrer qu'avant d'opérer son mouvement d'élévation, le corps tout entier incline légèrement en avant de manière à amener le centre de gravité au niveau des orteils où se trouvera la nouvelle base de sustentation. Et ce n'est qu'ensuite que le mouvement d'élévation a lieu.

En effet, « placez horizontalement sur une table, dit M. Bédart, à la hauteur du nombril, une règle qui la dépasse ; approchez-vous le corps bien droit jusqu'au contact avec la règle ; à ce moment, essayez de vous dresser sur la pointe des pieds, la règle sera repoussée. » Et il sera impossible de réaliser le mouvement sans repousser la règle, ce qui montre bien que ce mouvement n'est possible qu'à la condition d'incliner le corps en avant.

L'expérience établit donc que, pour que l'élévation et la station sur la pointe des pieds se produisent, il faut préalablement que le centre de gravité ait été porté en avant. D'autre part, il est facile de comprendre que l'action du gastrocnémien toute seule n'a d'autre effet que de rapprocher ses deux insertions, son insertion supérieure fémoro-tibiale de son insertion inférieure au calcanéum, mais qu'il ne saurait dépendre de lui de rendre fixe l'une ou l'autre de ses insertions. C'est donc dans une force en dehors de lui que la cause de la fixation de l'une ou l'autre de ses extrémités doit être cherchée. Si c'est l'insertion au calcanéum qui est rendue fixe, la contraction du gastrocnémien aura pour effet de fléchir le fémur sur le tibia, en même temps que d'attirer le tibia en arrière ; si c'est au contraire l'insertion supérieure qui est fixe, c'est le calcanéum qui s'élèvera. Or la cause qui rend fixe l'une ou l'autre de ces insertions doit être cherchée d'abord dans la pesanteur.

Si la ligne de gravité du corps passe en avant de l'articulation tibio-tarsienne, l'effort de la pesanteur s'opposant à la flexion de l'articulation du genou et au déplacement en arrière de l'extrémité supérieure du tibia, la contraction du gastrocnémien n'aura d'autre alternative que de soulever le talon.

Si la fixité de l'insertion supérieure est obtenue par d'autres moyens, le même résultat a lieu. Ainsi, appuyons-nous le dos et les talons contre un mur, nous nous élèverons sans difficulté sur la pointe des pieds. Nous remarquons en même temps que ce mouvement ne s'accomplit qu'à condition que le mur supporte une certaine pression ; qu'arrive-t il alors ? C'est que le mur empêche la chute en arrière ; par suite, l'inclinaison en arrière de l'extrémité supérieure du gastrocnémien se trouvant fixée, la contraction ne peut pas ne pas amener l'élévation de l'autre insertion, c'est-à-dire du talon.

Remarquons que, dans ce cas, la ligne de gravité du corps peut passer indistinctement par l'articulation tibio-tarsienne ou bien en un point situé en arrière du talon. Si la ligne de gravité passe par l'articulation, le système

forme un levier du deuxième genre. Si cette même ligne passe en arrière du talon, nous sommes en présence d'un levier du troisième genre. Or, dans les deux cas, le soulèvement sur la pointe du pied peut également avoir lieu, mais l'équilibre de la station ne peut exister sans point d'appui pris en arrière sur un corps étranger.

Si nous reprenons l'expérience de la règle de tout à l'heure, nous verrons qu'il est possible de soulever le corps sans toucher à la règle, mais à la condition de ne le faire qu'un instant en perdant l'équilibre et en retombant aussitôt sur les talons pour empêcher la chute imminente en arrière.

Grâce à quel mécanisme ce soulèvement momentané a-t-il pu se produire? En vertu du même mécanisme que celui qui a été invoqué tout à l'heure. Nous savons en effet que, dans la station droite, la ligne de gravité passe bien en avant de l'articulation tibio-tarsienne et de l'articulation du genou. Cette dernière est donc maintenue en extension par la seule force de la pesanteur. Et l'extrémité supérieure du tibia étant ainsi rendue fixe, la contraction du gastrocnémien a pour effet nécessaire de soulever le talon. Mais comme dans cette expérience la ligne de gravité ne passe pas par la nouvelle base de sustentation formée par les orteils, la chute en arrière est inévitable. En effet, l'équilibre de la station sur la pointe des pieds, comme de toute espèce de station, ne peut être maintenu qu'à la condition que la ligne de gravité passe par la base de sustentation. Il résulte de ce qui précède que l'effort qui consiste à soulever le corps sur la pointe des pieds peut être fait, ainsi que nous l'avons dit en commençant, dans n'importe quelle position de la ligne de gravité, c'est-à-dire d'après le mécanisme variable des divers genres de leviers.

Mais la position n'est stable que si, la ligne de gravité passant par les orteils, le système représente un levier du premier genre.

C. — STATION VERTICALE HANCHÉE OU ASYMÉTRIQUE

Mécanisme. — Dans la station hanchée, le poids du corps, au lieu d'être supporté également par les deux jambes comme dans la station droite, se trouve presque complètement reporté sur une seule jambe ; une jambe, en effet, demeure dans l'extension comme une colonne rigide, pendant que l'autre, fléchie dans l'articulation du genou, est portée un peu en avant et ne sert plus qu'à affermir l'équilibre. La pression de cette dernière jambe sur le sol est fort minime et ne dépasse pas de beaucoup le poids du membre lui-même (fig. 149 et 150).

La jambe sur laquelle le corps s'appuie prend le nom de jambe portante. Si cette jambe est la droite, on dit que l'homme hanche à droite.

Le membre inférieur droit est alors dans l'extension complète et le mécanisme qui maintient cette extension n'est autre que celui que nous avons indiqué pour la station verticale droite. La ligne de gravité du tronc passe en arrière de l'articulation coxo-fémorale et en avant de l'articulation du genou, d'où il suit que l'extension de ces deux articles est presque uniquement maintenue par le poids même des parties situées au-dessus d'elles et limitée par la distension des ligaments et des muscles. Quant au maintien de l'articulation

tibio-tarsienne, le rôle actif du gastrocnémien est le même dans les deux cas. L'autre membre inférieur est fléchi dans toutes ses articulations. Cette flexion est maintenue sans effort musculaire et est une des conséquences de l'inclinaison du bassin de ce côté.

Le bassin en effet, au moment où l'homme passe de la station droite à la station hanchée, subit un triple déplacement. Il exécute d'abord un mouvement autour de l'articulation coxo-fémorale de la jambe portante : rotation autour d'un axe sagittal en vertu duquel il s'abaisse de l'autre côté ; de plus, il tourne légèrement autour d'un axe vertical qui semble passer vers son centre, d'où il suit que la hanche portante se porte un peu en arrière pendant que l'autre est



Fig. 149. — Station hanchée; vue antérieure.

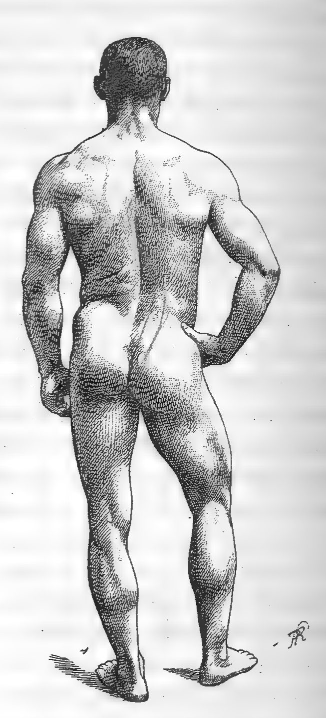


Fig. 150. — Station hanchée, vue postérieure.

déplacée en avant et cela d'autant plus que la jambe fléchie est davantage portée dans le même sens; enfin le bassin tout entier est déplacé latéralement du côté de la jambe portante. Ce déplacement latéral est nécessité par le transport de la ligne de gravité dans l'aire de sustentation du pied portant.

Cette obliquité du bassin n'exige, pour être maintenue, que peu ou point d'effort musculaire. Son mécanisme rappelle celui de l'extension de l'articulation de la hanche et peut être ramené à un levier du premier genre, dont le point d'appui se trouve dans l'articulation coxo-fémorale, sa puissance en dedans représentée par la ligne de gravité du torse, et la résistance en dehors au point d'insertion à la crête iliaque du grand ligament iléo-fémoro-tibial,

dont la distension limite le mouvement. Cette distension est manifeste sur le nu et influe grandement sur la morphologie de la région. A la distension ligamenteuse, s'ajoute la distension des muscles situés sur la face externe de la hanche : c'est, en avant, le tenseur du *fascia lata*, au milieu le moyen fessier, et en arrière le faisceau supérieur du grand fessier.

La distension de ces muscles n'est pas entièrement passive, et elle s'accompagne certainement d'un certain degré de contraction.

Le tronc tout entier, sous peine de chute latérale, ne saurait suivre l'obliquité du bassin. Il en résulte que la colonne vertébrale s'infléchit à sa base pour ramener la partie supérieure du torse au-dessus de l'aire de sustentation. La colonne subit donc une inflexion latérale dont la convexité est tournée du côté où le bassin incline. Cette courbure siège généralement au niveau de la jonction de la région lombaire et de la région dorsale. Elle empiète sur les deux régions. L'anatomie nous apprend que la colonne lombaire peut s'infléchir latéralement sans qu'il s'y joigne aucun mouvement de torsion ; mais il n'en est pas de même pour la région dorsale, qui ne peut s'infléchir latéralement sans subir en même temps un mouvement de rotation dû à la rencontre des surfaces obliques des apophyses articulaires et dont le résultat est de tourner la face antérieure de la colonne du côté de la concavité de la courbure. On peut constater que, dans la station hanchée, l'axe des épaules subit, par rapport à l'axe des hanches, un certain degré de rotation dont la raison, pensons-nous, se trouve dans la torsion de la colonne que nous venons d'indiquer (fig. 151).

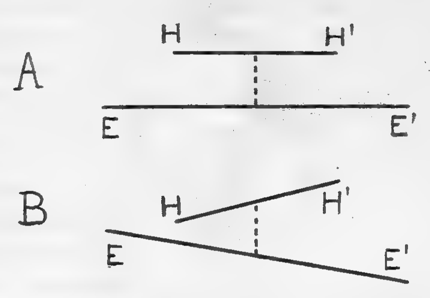


Fig. 151. — Projection sur plan horizontal de l'axe des épaules et de celui des hanches dans la station droite (A) et dans la station hanchée (B). — HH', axe des hanches. — EE', axe des épaules.

Cette courbure de la colonne vertébrale a pour effet de rapprocher les côtes du côté de la concavité et au contraire, du côté opposé, de les écarter les unes des autres (je parle, ici, seulement des côtes inférieures en rapport avec la portion infléchie de la colonne dorsale), d'où il suit que le thorax, comprimé et comme tassé d'un côté, subit du côté opposé une véritable ampliation. Une des conséquences de cette déformation du thorax est une différence de niveau dans la hauteur des épaules. L'épaule est abaissée du côté où le thorax est déprimé pendant que la hanche du même côté est élevée ; l'autre épaule est, au contraire, située à un niveau plus élevé, soulevée pour ainsi dire par l'ampliation thoracique, au-dessus de la hanche, qui par contre est abaissée.

La partie supérieure de la colonne vertébrale est droite et ne subit d'inflexions que suivant le port de la tête qui, en s'inclinant de côté, entraîne une courbure cervico-dorsale, de même sens ou de sens contraire que la courbure dorso-lombaire. C'est ainsi que sur un homme qui hanche à droite, si la tête s'incline de ce même côté, toute la colonne offre l'image d'une courbe unique étendue du sacrum à l'occipital. Si la tête penche à gauche, la colonne

prend alors la forme d'un *S* italique dont les deux courbures de sens inverse sont formées, l'une par la colonne dorso-lombaire, l'autre par la colonne cervico-dorsale.

D. — STATION A GENOUX

Dans la station à genoux, le corps porte sur la rotule encastrée pour ainsi dire dans la trochlée fémorale. Aussi la base de sustentation ainsi fournie est-elle fort étroite, en outre qu'elle est arrondie. D'où il résulte que, dans la station sur un seul genou, l'équilibre est presque impossible. La présence des deux genoux élargit latéralement cette base qui se trouve agrandie dans le sens antéro-postérieur par le contact constant des doigts de pieds ou de la jambe elle-même avec le sol, de sorte qu'en somme l'aire de sustentation de la station à genoux est bien plus grande que celle de la station sur la plante des pieds, puisqu'elle a la forme d'un rectangle dont les petits côtés varient suivant l'écartement des genoux et des pieds et dont les grands côtés sont égaux à la longueur de la jambe.

Lorsque le corps est droit, la ligne de gravité passe au niveau des genoux. Si le corps penche en arrière, la ligne de gravité, ramenée plus en arrière, passe plus près du centre de la base de sustentation et l'équilibre est plus assuré.

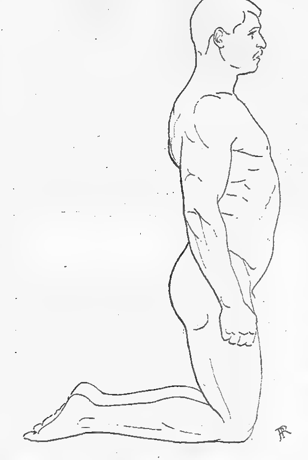


Fig. 152. — Station à genoux, le corps droit.

Dans le premier cas, c'est-à-dire lorsque le corps est droit (fig. 152), les aplombs du corps diffèrent sensiblement de ce qu'ils sont dans la station verticale. On observe, en effet, une inclinaison très prononcée du bassin en avant, d'où résulte une exagération de la cambrure lombaire. L'inclinaison du bassin en avant est due à l'insuffisance du muscle droit antérieur qui, porté d'autre part par la flexion du genou à un certain degré d'élongation, ne saurait se laisser distendre davantage et met obstacle au redressement du bassin. Si le torse penche trop en arrière, la position devient extrêmement fatigante à cause de la contraction exagérée des extenseurs de la jambe, destinés à empêcher la flexion de la cuisse sur la jambe. Mais si cette flexion de la cuisse sur la jambe s'accomplit, il arrive que les fesses prennent un point d'appui sur les talons et que la station à genoux se transforme en une sorte de station assise familière aux individus qui, par métier ou par sentiment religieux, doivent prolonger au delà d'un certain temps la station sur les genoux.

E. — STATION ASSISE

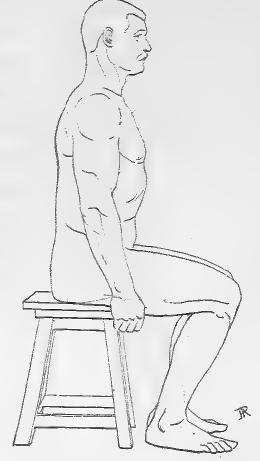
Dans la station assise, les membres inférieurs n'entrent pour ainsi dire pas en ligne de compte et le tronc porte directement sur le plan résistant,

sol ou siège. Il repose sur les ischions recouverts des muscles fessiers. Le bassin devient presque horizontal et la courbure des reins disparaît (fig. 153). Les cuisses, fléchies à angle droit sur le tronc, reposent par leur face inférieure, dans une étendue plus ou moins considérable, sur le plan d'appui, et, suivant la hauteur du siège, les pieds touchent ou ne touchent pas le sol.

La ligne de gravité passe alors par une base de sustentation fort large et qui rend l'équilibre très stable. Cette base est surtout étendue en avant par suite de la disposition des membres inférieurs fléchis ; ce qui permet au torse de s'incliner fortement en ce sens sans crainte de chute.

Il n'en est pas de même en arrière où la ligne de gravité, dépassant facilement la base de sustentation de ce côté, ne permet pas au tronc de se déplacer beaucoup en ce sens. Cependant le tronc peut s'incliner d'une quantité assez notable en arrière à la condition d'établir un contrepoids en avant, soit en allongeant les jambes, soit en fléchissant un genou et en s'y accrochant par les mains.

Je ne parle pas des cas dans lesquels la chute en arrière est empêchée par un dossier plus ou moins incliné qui fournit en même temps un appui à la tête. Car alors, le corps se trouvant tout entier abandonné à l'action de la pesanteur, il s'agit plutôt d'une variété du décubitus.


Fig. 153. — Station assise, le corps droit.

La station assise peut donc être variée de mille façons, suivant que le bassin repose à terre ou sur un siège plus ou moins élevé, que les membres inférieurs sont étendus ou diversement fléchis et que le tronc est incliné en avant ou en arrière.

Dans la station assise, le buste droit, les formes extérieures du corps diffèrent notablement de ce qu'elles sont dans la station droite. Les différences existent surtout dans sa moitié inférieure, au ventre, aux reins, et au bassin. Elles sont la conséquence de l'horizontalité du bassin.

Le ventre est saillant et sillonné des plis transversaux qui se produisent lors de la flexion du tronc en avant. La colonne lombaire se redresse et se recourbe même parfois en sens opposé. Les saillies des apophyses épineuses lombaires s'accentuent. Les muscles lombaires situés de chaque côté sont distendus, et les fesses, suivant leur volume, forment, en arrière et sur les côtés, un relief plus ou moins accentué résultant du refoulement des parties molles pressées entre le bassin et le plan résistant qui sert de siège.

F. — PATHOLOGIE DE LA STATION

Nous avons vu plus haut que les différents segments du corps, dans la station droite, sont inclinés les uns sur les autres. Il est bien certain qu'à l'état normal le degré de cette obliquité des divers segments du corps peut

varier d'un sujet à l'autre. Mais ce qui est important, c'est que cette obliquité ne s'efface jamais et que, si les angles qui en résultent peuvent, dans une certaine mesure, s'ouvrir et se fermer, ils ne disparaissent jamais complètement et à plus forte raison ne sont jamais remplacés par des angles ouverts en sens inverse.

Certaines conditions pathologiques, au contraire, jettent le plus grand trouble dans la formule normale, au point de la renverser en tout ou en partie.

C'est ainsi, par exemple, que l'attitude bien connue de la paralysie agitante, dans son type de flexion, nous montre une inclinaison des axes des principaux segments du corps en sens inverse de l'état normal. Il suffit de comparer la figure 154 (A) avec la figure de l'état normal (fig. 148) : le torse incliné en avant, les articulations de la hanche et du genou fléchies. Une semblable attitude n'est possible qu'à la condition que les muscles aient conservé leur activité, et elle ne peut être gardée sans fatigue. Elle exige, en effet, la contraction permanente des fessiers et des quadriceps fémoraux, qui, dans la station normale, sont inactifs. Elle s'explique dans la paralysie agitante par l'état de rigidité et de demi-contracture dans lequel se trouvent tous les muscles.

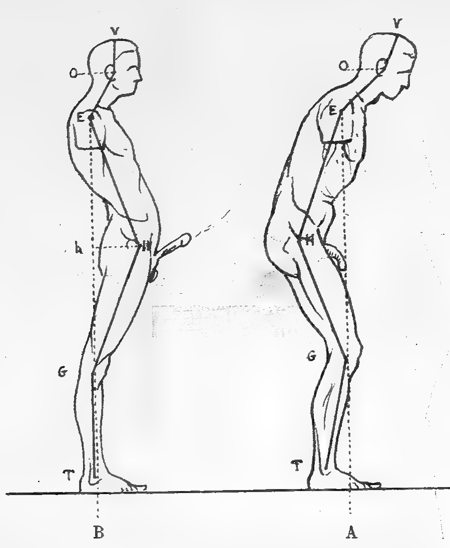


Fig. 154. — Types de stations pathologiques. — A, type de flexion. — B, type d'extension.

Nous avons observé cette attitude fléchie dans un cas de contracture hystérique des muscles du tronc. Le malade ne pouvait la garder que quelques instants, tant elle était fatigante.

L'attitude apathique signalée par Weir-Mitchell, précisée par Féré, est également une attitude de flexion. Cette attitude se rencontre dans les états de dépression acquis ou accidentels, dans les états mélancoliques, etc.

Elle ne peut s'expliquer que par un état de rigidité catatonique ou cataleptoïde. C'est ce qui a lieu d'ordinaire. Cette attitude fléchie, qui exige l'intervention de la force musculaire, n'existe naturellement pas dans les amyotrophies quelque peu généralisées, où l'on observe au contraire une exagération de l'obliquité normale des différents segments du corps (fig. 154, B).

Dans l'ataxie locomotrice, on observe quelque chose d'analogue. Il en résulte une sorte d'élargissement de la base de sustentation dans le sens antéro-postérieur, qui contribue à assurer l'équilibre.

Dans ces cas de station anormale à type d'extension, que les muscles aient gardé leur activité ou qu'ils soient plus ou moins impuissants, l'équilibre de la station n'en est pas moins assuré. Nous avons vu, en effet, que l'action des

fessiers et des quadriceps n'était point nécessaire et que si le gastrocnémien, lui, au contraire, était indispensable, il se produisait, dans la myopathie, telle modification de structure qui le transformait pour ainsi dire en ligament et suppléait dans ce cas à son inertie.

Mais il n'en est pas de même, par exemple, si la paralysie envahit à la fois tous les muscles de la jambe, comme dans certains cas de névrites périphériques. Tous les mouvements du pied sont alors supprimés et, dans la station debout, aucune tension musculaire n'intervient pour limiter dans un sens ou dans l'autre les mouvements de l'articulation tibio-tarsienne. Il en résulte que l'équilibre ne peut avoir lieu qu'à la condition que la ligne de gravité passe exactement par cette articulation ; mais l'étroitesse de cette base de sustentation est telle que la ligne de gravité à chaque instant s'en échappe, et ne peut y être ramenée que par une sorte de piétinement sur place. C'est ce qui a lieu en effet. Il se passe là quelque chose d'analogue à ce qui se produit dans la station sur deux pilons ou sur des échasses.

Vue de face, soit par devant, soit par derrière, la station debout, dans le type normal, devrait présenter les caractères suivants, qui découlent tous d'une symétrie parfaite entre les deux côtés du corps humain :

1° Absolue rectitude de la tête, de la colonne vertébrale et, par suite, du tronc ;

2° Horizontalité des deux épaules ;

3° Horizontalité du bassin et par suite des épines iliaques antérieure et supérieure, des fossettes latérales lombaires, des plis fessiers ;

4° Rectitude des membres inférieurs qui doivent se toucher par la paroi supérieure des cuisses, les genoux et les malléoles.

Nous savons que cette symétrie parfaite n'existe pas, et qu'il faut faire la part des imperfections néanmoins compatibles avec l'état normal. Il suffit de constater que, dans cette forme de station, le corps portant également sur les deux pieds, la ligne de gravité suit exactement la ligne qui partage en deux moitiés le corps humain, et, après avoir suivi la ligne médiane du torse, descend verticalement entre les deux membres inférieurs.

Or, nous savons que certains états morbides, par exemple les sciatiques anciennes, ont pour effet de modifier cet équilibre de la station, en reportant le poids du corps sur le côté. Il se produit alors une inclinaison latérale de l'axe du torse d'un côté ou de l'autre et un changement variable dans l'inclinaison de l'axe des épaules et parfois du bassin. Dans le lumbago, même récent, une semblable inclinaison latérale s'observe souvent, en outre de l'inclinaison en avant.

Le pathologiste peut également tirer de précieuses indications des modifications que la maladie apporte aux autres modes de station, station sur la pointe des pieds, station sur les talons (1), station hanchée (2), station à ge-

(1) Paul Richer et Henry Meige, De la station sur les talons chez les myopathiques (*Revue neurologique*, 30 juin 1894). — Paul Richer, La marche et la station chez l'homme sain et chez les malades myopathiques (*Revue scientifique*, 1894, et *Nouvelle Iconographie de la Salpêtrière*, 1894).

(2) Paul Richer, Des rapports de la station hanchée avec la scoliose dorsale primitive des adolescents (*Nouvelle Iconographie de la Salpêtrière*, 1896, p. 12).

noux, station assise, etc., mais nous ne pouvons nous étendre ici plus longuement sur ce sujet, quelque intéressant qu'il soit.

III. — DE LA LOCOMOTION PROPREMENT DITE

Dans une étude sur la locomotion, c'est le nom de M. le professeur Marey qui doit être prononcé le premier. C'est à lui, en effet, que nous devons la plupart des connaissances que nous possédons aujourd'hui sur ce sujet. Grâce à la mise en œuvre d'une méthode nouvelle, la méthode graphique créée par lui et dont les services, dans toutes les branches de la biologie, ne sont plus à compter, il est parvenu à donner à ces études le caractère de certitude et de précision scientifique qui, jusque-là, leur avait manqué. Il serait injuste cependant de ne pas rappeler les anciens et premiers travaux de Borelli (1), ceux plus récents de Barthez (2), de Gerdy (3), de Maissiat (4), de Giraud-Teulon (5) et surtout ceux des frères Weber (6), qui ont longtemps fait autorité en la matière. Il reste peu de choses de l'édifice élevé par ces derniers auteurs, et Duchenne (de Boulogne) (7), par des arguments tirés de l'observation pathologique, a contribué à redresser plus d'une de leurs erreurs, apportant ainsi le plus précieux appoint aux études sur la locomotion.

Au nom de M. Marey, il faut joindre celui de deux de ses élèves : Carlet (8), qui sous son inspiration fit un des premiers l'application des appareils enregistreurs à l'étude de la marche, et Demeny, qui étudia plus particulièrement les questions de dynamique.

C'est donc à la méthode graphique que nous sommes redevables de la plupart des notions que nous possédons aujourd'hui.

Nous n'avons pas ici à exposer dans ses détails en quoi consiste cette méthode. Nous devons néanmoins faire connaître les procédés mis en usage, en ce qui concerne plus spécialement l'étude de la locomotion. Nous le ferons d'après les ouvrages que M. Marey a consacrés à ces questions (9).

Un des éléments les plus importants dans l'étude de la locomotion est la détermination de la pression des pieds sur le sol. Les appareils enregistreurs se prêtent parfaitement à cette étude : un appareil explorateur placé sous la plante du pied envoie à un levier inscripteur le signal de l'appui ou du lever du pied, ainsi que l'expression de la force avec laquelle le pied appuie sur le sol. Cet appareil est la chaussure exploratrice de M. Marey ; en voici la description (fig. 155 et 156) :

(1) Borelli, *De motu animalium*, 1680.

(2) Barthez, *Nouvelle Mécanique des mouvements de l'homme et des animaux*, 1798.

(3) Gerdy, Mémoire sur la marche (*Journal de physiologie de Magendie*, 1829).

(4) Maissiat, *Études de physique animale*. Paris, 1843.

(5) Giraud-Teulon, art. Locomotion du *Dictionnaire* de Dechambre et *Principes de mécanique animale*, 1858.

(6) Weber (E. et W.), *Mécanique des organes de la locomotion* (traduction de Jourdan). Paris, 1843.

(7) Duchenne (de Boulogne), *Physiologie des mouvements démontrée à l'aide de l'exploration électrique et de l'exploration clinique*. Paris, 1867.

(8) Carlet, *Annales des Sc. natur.*, t. XVI. Paris, 1872.

(9) Marey, *La Machine animale. Locomotion terrestre et aérienne*. Paris, Germer-Baillière, 1878. — *Le Mouvement*. Paris, Masson, 1894.

Dans l'intérieur d'une forte semelle en caoutchouc, est une chambre à air figurée sur la figure par des lignes ponctuées. Cette chambre est comprimée au moment où le pied exerce sa pression sur le sol. L'air, chassé de cette cavité, s'échappe par un tube de transmission dans un tambour à levier, qui écrit sur l'enregistreur la durée et les phases de la pression du pied.

Les deux pieds étant munis de la chaussure exploratrice, une expérience de marche donne lieu au tracé suivant que nous empruntons à M. Marey (fig. 157).



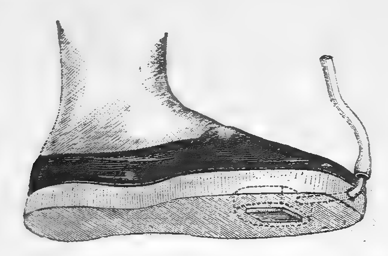


Fig. 155. — Chaussure exploratrice des appuis du pied de l'homme sur le sol ; un tube de transmission fait communiquer la chambre à air avec le tambour du chronographe (Marey).

Fig. 156. — Marcheur muni des chaussures exploratrices et portant le chronographe (Marey).

Au pied droit correspond la ligne pleine D ; au pied gauche la ligne ponctuée G. On voit que la pression du pied droit, par exemple, débute au moment

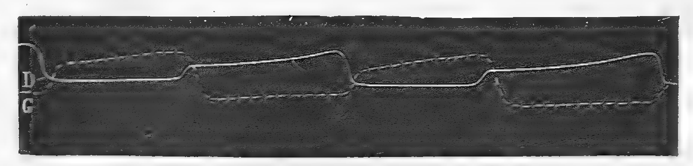


Fig. 157. — Tracé des appuis et soutiens des deux pieds dans la marche ordinaire (Marey).

où celle du pied gauche commence à décroître, et qu'il y a, dans tout le tracé, alternance entre les appuis des deux pieds.

Les appuis du pied droit et ceux du pied gauche ont la même durée, de sorte que le poids du corps passe alternativement d'un pied sur l'autre. Il est toutefois un instant très court pendant lequel le corps est partiellement supporté par un pied, lorsque déjà il commence à s'appuyer sur l'autre : ce temps ne correspond guère qu'à un sixième de la durée d'un appui. C'est la période de double appui dont nous parlerons plus loin.

M. Marey a déduit également des courbes précédentes la mesure de l'effort exercé par le pied sur le sol. Dans la marche, la pression du pied sur le sol n'est pas seulement égale au poids du corps que le pied doit soutenir, mais

un effort plus grand se produit, à un moment donné, pour imprimer au corps les mouvements de soulèvement et de progression que nous étudierons plus loin.

D'après les expériences de M. Carlet, cet effort additionnel n'excéderait pas 20 kilos, même dans la marche rapide, mais il est beaucoup plus grand dans la course et dans le saut.

Aussi M. Marey, pour étudier la pression des pieds sur le sol pendant le saut, a-t-il imaginé un nouvel appareil, la plate-forme dynamographique, dont la description nous entraînerait trop loin et pour laquelle nous renvoyons à l'auteur (1).

Qu'il nous suffise de dire que cette plate-forme est réunie par un tube à un levier inscripteur, qui s'élève d'autant plus que l'effort exercé sur elle est plus considérable. Pour l'étude du saut sur place, un dispositif spécial permet d'inscrire en même temps le déplacement d'un point du corps, de la tête par exemple, dans le sens vertical. On obtient ainsi les courbes suivantes, qui

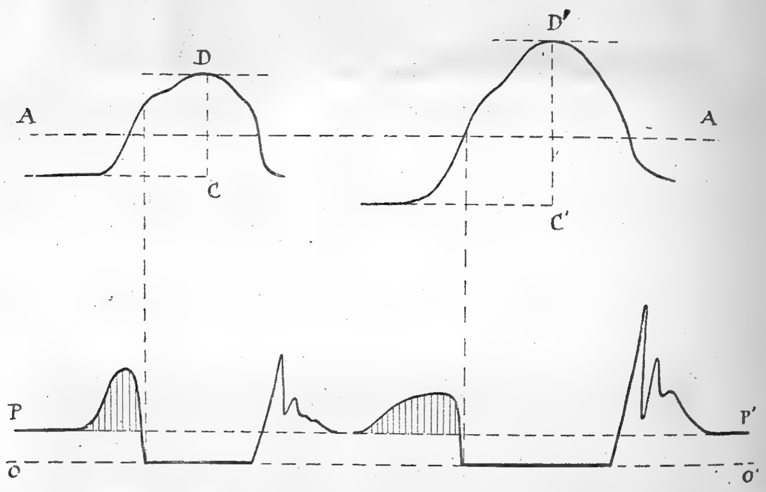


Fig. 158. — Courbes supérieures : changement de hauteur de la tête dans le saut. — Courbes inférieures : pression des pieds sur le sol (Marey).

correspondent à deux sauts dans lesquels, partant de l'attitude accroupie, l'homme s'est élevé à des hauteurs différentes (fig. 158).

La méthode graphique a permis également à M. Marey d'étudier les mouvements si complexes que l'action des jambes imprime à la masse du corps.

Il a déterminé ainsi, à l'aide d'un appareil très simple (2), composé essentiellement de deux tambours à levier réunis par un long tube de caoutchouc et fixé sur les bras horizontaux d'un manège que l'homme en expérience pousse devant lui, les diverses oscillations du pubis.

Ces oscillations sont de deux sortes. Elles se produisent dans le sens ver-

(1) Marey, *Le Mouvement*, p. 145.
(2) Id., *La Machine animale*. p. 122.

tical et dans le sens horizontal. Le tracé ci-joint, emprunté à M. Marey, montre que deux oscillations dans le sens vertical correspondent à une seule oscillation horizontale (fig. 159). Le tracé de l'appui des pieds pris simultanément montre à quel moment du pas ces oscillations se produisent.

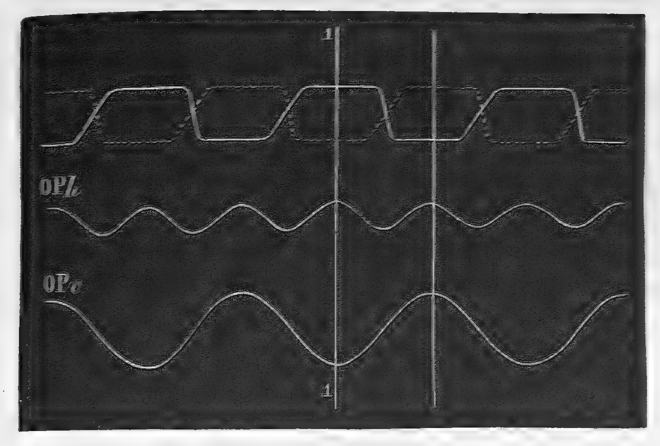


Fig. 159. — Les courbes supérieures, l'une pleine, l'autre ponctuée, représentent les phases d'appui et de lever des pieds droit et gauche. En lisant la figure de gauche à droite, chaque ascension d'une courbe indique le début d'un appui; la partie horizontale supérieure correspond à la durée de l'appui et la descente au lever du pied. Enfin la partie horizontale inférieure de chacune des courbes indique que le pied correspondant est en l'air. — OP*h*, oscillations du pubis de haut en bas, c'est-à-dire verticalement. — OP*v*, oscillations dans le sens latéral ou horizontalement. On voit que deux oscillations dans le sens vertical correspondent à une seule oscillation horizontale (Marey).

Si l'on voulait donner, dit M. Marey, une idée de la trajectoire véritable du pubis sous l'influence de ces deux ordres d'oscillations combinées avec la translation en avant, il faudrait construire une figure solide. Avec un fil de

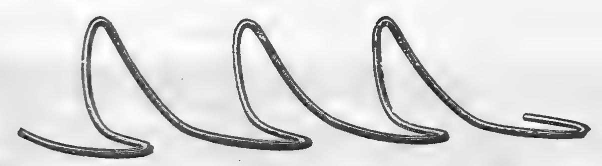


Fig. 160. — Tentative de représentation, au moyen d'une tige de métal courbée, de la trajectoire sinueuse parcourue par le pubis. Pour comprendre la perspective de cette figure solide, il faut supposer que le fil de fer est par son extrémité gauche, rapproché de l'observateur, tandis que par son extrémité droite il s'en éloigne. (L'amplitude des oscillations a été fort exagérée pour qu'elles soient plus saisissables.) (Figure extraite de *la Machine animale* par J. Marey.)

fer tordu en divers sens, on peut exprimer assez clairement cette trajectoire (fig. 160).

A l'aide du même appareil légèrement modifié, M. Marey a également démontré que le mouvement de translation, dans la marche, ne s'exécute pas d'une manière uniforme, mais qu'à chaque pas le pied, qui presse sur le sol

avec une force croissante du commencement à la fin de son appui imprime au corps une impulsion dont la vitesse est également croissante.

Appliquée aux diverses allures de l'homme, la méthode graphique a permis à M. Marey d'en donner, au point de vue du rythme, la notation suivante :

La figure 161 représente la notation synoptique des quatre allures à type régulier dans lesquelles les deux pieds agissent tour à tour.

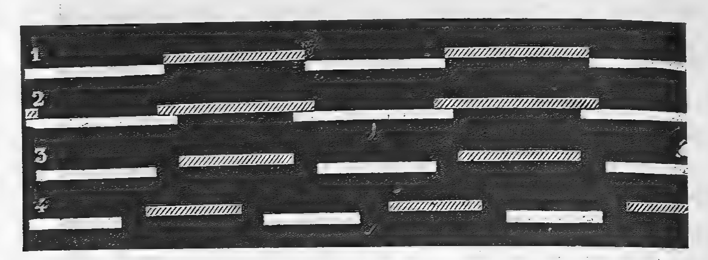


Fig. 161. — Notation chronographique des appuis des pieds de l'homme à différentes allures (Marey).

La ligne 1 représente la notation de l'allure du pas. L'appui du pied droit est représenté par un trait blanc épais, dont la longueur correspond à la durée de cet appui. Pour le pied gauche, le trait est composé de hachures obliques. On voit ainsi que, dans le pas, l'appui d'un pied succède à celui de l'autre, sans qu'il y ait jamais d'intervalle entre les deux.

La ligne 2 est la notation qui correspond à l'ascension d'un escalier. On voit que les foulées empiètent l'une sur l'autre et que, par conséquent, le corps, pendant un instant, repose sur les deux pieds à la fois.

La ligne 3 correspond au rythme de la course. Après une foulée du pied droit plus brève que dans le pas, on voit un intervalle qui correspond à la suspension, puis une courte battue du pied gauche suivie d'une suspension nouvelle, et ainsi de suite.

La ligne 4 répond à une course plus rapide.

La figure 162 est la notation du galop des enfants, allure dans laquelle les

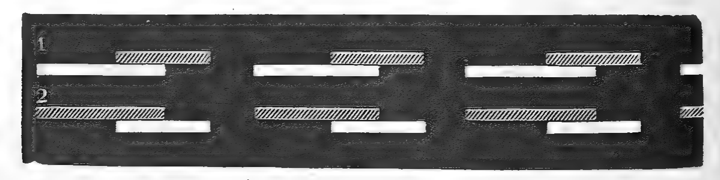


Fig. 162. — Notation du galop. — 1, galop à gauche. — 2, galop à droite (Marey).

pieds n'exécutent pas tous deux le même mouvement. La ligne 1 représente le galop à gauche, c'est-à-dire le pied gauche toujours en avant. On voit que le pied droit appuie le premier sur le sol; que le gauche retombe ensuite et touche terre pendant moins longtemps, puis qu'il se produit une suspension après laquelle le pied droit retombe de nouveau, et ainsi de suite. Ainsi, dans le galop, le corps est tantôt en l'air, tantôt sur un pied, tantôt sur deux.

Du résumé qui précède des premières expériences de M. Marey, se déga-

gent un certain nombre de résultats importants, que nous n'avons fait que signaler parce que nous y reviendrons plus loin, et que la précision de la méthode a pu classer, dès le début, parmi les faits définitivement acquis à l'histoire de la locomotion. Mais pour exprimer tous les changements de position et d'attitude des membres et du corps, l'inscription mécanique devenait insuffisante.

C'est alors qu'intervint la chronophotographie.

Tout d'abord, M. Marey imagina d'obtenir sur la même plaque une série d'images successives d'un corps en mouvement. C'est la chronophotographie sur plaque fixe. Appliquée à l'étude de la locomotion, elle donne les résultats les plus intéressants. Elle consiste essentiellement à faire passer dans le champ d'un objectif ouvert sur un fond noir un homme qui se déplace. Pour que la trace laissée sur la plaque ne soit point continue et confuse, un dispositif spécial permet d'admettre la lumière dans la chambre noire d'une façon intermittente et à des intervalles égaux. On obtient alors une image discon-

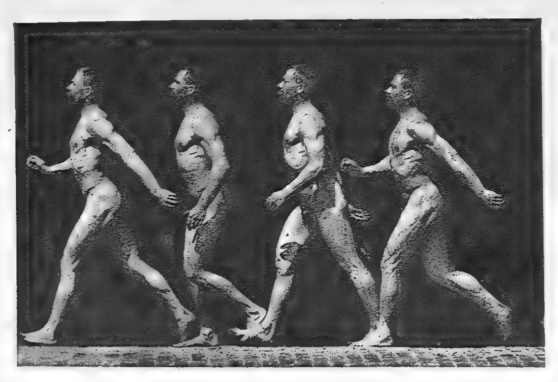


Fig. 163. — Un homme qui marche; attitudes successives données par la chronophotographie sur plaque fixe (Marey).

tinue, dans laquelle sont représentées les positions successives de l'homme qui se déplace (fig. 163).

Suivant la fréquence des éclairements et la rapidité du marcheur, on obtient des images successives en nombre variable et plus ou moins rapprochées. Plus l'allure est lente, moins nombreuses seront les ouvertures de l'objectif si l'on veut éviter que les images, en trop grand nombre, arrivent à se superposer et à engendrer la confusion. C'est ainsi que, à fréquence d'éclairement égale, les images d'un coureur seront bien plus espacées que celles d'un marcheur (fig. 164).

Pour augmenter le nombre des images sans qu'il y ait confusion, M. Marey a eu recours à l'artifice suivant, qui consiste à réduire la surface du corps étudié. C'est ainsi qu'un homme vêtu de velours noir et portant sur les membres des galons et des points brillants ne donne, dans l'image, que des lignes géométriques sur lesquelles pourtant se reconnaissent aisément les attitudes des différents segments des membres. C'est la chronophotographie géométrique (fig. 165).

La chronophotographie sur plaque fixe offre le grand avantage de pouvoir suivre très facilement les différentes phases du mouvement, mais elle offre l'inconvénient de ne pouvoir admettre qu'un nombre restreint d'images sous peine de confusion.

La chronophotographie sur plaque mobile remédie à ce désavantage, en

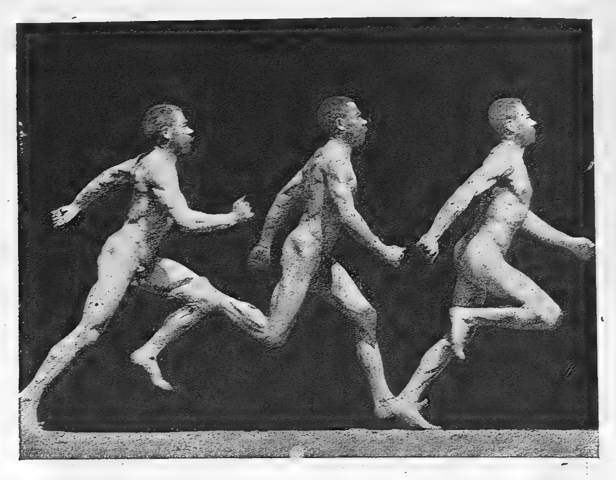


Fig. 164. — Un coureur. Chronophotographie sur plaque fixe (Marey).

permettant de prendre sans confusion possible un nombre d'images aussi considérable que l'on veut d'un mouvement donné. C'est à M. Janssen que revient l'honneur d'avoir inauguré, avec son revolver astronomique, la chronophotographie sur plaque mobile.

Mais c'est Muybridge (de San Francisco), qui, par une méthode assez diffé-

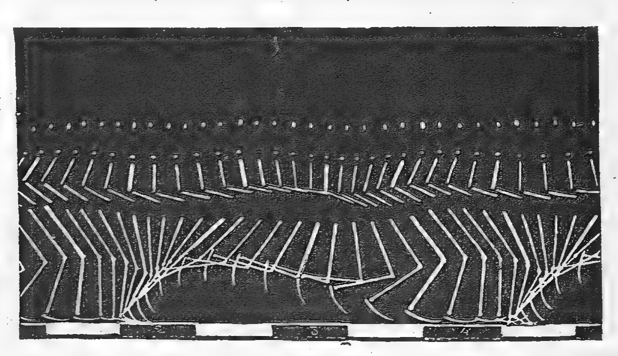


Fig. 165. — Images d'un coureur réduites à des lignes brillantes qui représentent l'attitude de ses membres (Chronophotographie géométrique) (Marey).

rente de M. Janssen, appliqua les mêmes principes à l'analyse de la locomotion de l'homme, du cheval et d'autres animaux.

M. Marey, avec son fusil photographique construit sur le principe du revolver de M. Janssen, donna le premier des images successives et distinctes du vol des oiseaux.

Mais bientôt M. Marey perfectionna la méthode en substituant à la plaque mobile du fusil photographique les bandes pelliculaires. Voici le principe de son appareil, d'après lequel tous les appareils industriels, dits depuis cinématographes, ont été imaginés.

Une bande de pellicule, animée d'une translation rectiligne, devra passer au foyer de l'objectif, s'arrêter pendant chaque pose et cheminer automatiquement d'une manière saccadée, en recevant une série d'images successives d'assez grandes dimensions. Comme la bande pelliculaire peut avoir plusieurs mètres de long, le nombre des images qu'on recueillera est pour ainsi dire illimité (1).

Notre ami, M. A. Londe, directeur du service photographique de la Salpêtrière, a imaginé un appareil à objectifs multiples qui nous a rendu, dans nos études sur la locomotion, les plus grands services.

Il est composé de douze objectifs donnant douze images distinctes sur une même plaque. Chaque image est de 7 centimètres sur 7 centimètres. Il est vrai que nous ne pouvons obtenir d'un même mouvement que douze images successives, mais un dispositif spécial permet de grouper ces douze images en un temps très court, ou de les espacer à des intervalles variables.

On a reproché avec raison à cet appareil de donner des images prises d'un point de vue différent. Cet inconvénient n'est sérieux que si l'on photographie, à une faible distance, des objets de petite dimension, ce qui n'est pas le cas dans l'étude de la locomotion humaine. Ces différences d'aspect nous ont toujours paru négligeables sur les photogrammes que nous avons obtenus.

Si l'on songe d'autre part que, même avec un appareil à objectif unique, l'homme qui marche est vu sous des points de vue différents suivant la place qu'il occupe dans le champ de l'objectif et que, par suite, les différentes images recueillies ne sont point davantage vues sous le même aspect, on conviendra qu'en ce qui concerne les résultats obtenus par nous, le reproche fait à l'appareil perd beaucoup de sa valeur.

Au point de vue de la notation des mouvements des différents segments du corps dans la locomotion, nos recherches personnelles entreprises avec le concours de notre ami A. Londe n'ont fait que confirmer les travaux de M. Marey. Nous avons essayé de compléter ces premiers et importants résultats par l'analyse de la contraction musculaire, d'après la méthode que nous avons déjà employée pour la solution des problèmes de statique humaine et qui consiste dans l'inspection du nu. Mais comme ici la rapidité des mouvements ne permettait pas de saisir, au simple examen, les modifications morphologiques qui constituent les éléments de notre appréciation, nous avons eu recours aux images instantanées que les procédés de la chronophotographie mettaient à notre disposition.

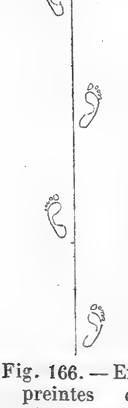
Nous allons, maintenant, exposer dans tous leurs détails les différents mouvements de la locomotion.

(1) Marey, *Le Mouvement*, p. 114.

DESCRIPTION DES MOUVEMENTS DE LA LOCOMOTION OU CINÉMATIQUE

A. — Du pas.

Si l'on veut mettre quelque clarté dans cette question, il faut d'abord nettement définir ce qu'on entend par pas, la marche, après tout, n'étant qu'une succession de pas. — Or, qu'est-ce qu'un pas? Littré nous dit qu'un pas, c'est l'action de mettre un pied devant l'autre pour marcher. On désigne aussi par pas l'espace qui se trouve compris d'un pied à l'autre quand on marche. Ainsi, dans le langage ordinaire, un pas est constitué par la série de mouvements qui se produisent entre le déplacement d'un pied et celui de l'autre pied. — M. Marey a fait très justement remarquer qu'au point de vue scientifique cette définition devrait être étendue, et qu'il fallait désigner par pas la série des mouvements qui s'exécutent entre deux positions semblables d'un même pied, de sorte que le pas de M. Marey correspond à deux pas du langage ordinaire : c'est un double pas. J'accepte la définition de M. Marey, mais je crois préférable de conserver le nom de double pas qui a l'avantage de ne rien changer à la signification généralement admise, et, par suite, ne saurait prêter à aucune confusion.


Fig. 166. — Empreintes des pieds dans la marche.

Or, c'est le double pas que nous devons considérer. Le double pas est exécuté par chaque membre, non plus successivement, mais simultanément, de manière que le double pas droit, par exemple, empiète sur le double pas gauche de la moitié de sa longueur, ou d'un pas, et réciproquement.

De la méthode des empreintes. — La trace laissée sur le sol par les pieds pendant la marche a été utilisée par plusieurs auteurs pour l'étude de la locomotion. Nous citerons, seulement pour mémoire, la méthode de M. Vierordt, pour décrire celle qui a été employée par M. Gilles de la Tourette (1) dans ses études sur la marche normale et pathologique et dont les résultats sont des plus intéressants. La technique de M. Gilles de la Tourette est empruntée à M. Neugebauer. On frotte la plante des pieds du sujet avec du sesquioxyde de fer pulvérulent, puis, le plaçant, au départ, à l'extrémité d'un rouleau de papier de 7 à 8 mètres de long et de 50 centimètres de large, étendu sur le sol et divisé en deux dans toute sa longueur par un trait, on le fait marcher droit devant lui, jusqu'à l'autre extrémité de la bande. Les pieds laissent sur le papier des empreintes colorées en rouge (fig. 166).

Les résultats obtenus par M. Gilles de la Tourette sur des sujets normaux sont relatifs à la longueur du pas et à la situation des pieds droit et gauche par rapport à la ligne médiane directrice qui prend le nom de ligne de marche. Voici les conclusions de l'auteur :

(1) Gilles de la Tourette, Études cliniques et physiologiques sur la marche (*Th. de Paris*, 1886).

1° La longueur moyenne du pas est égale :

Chez l'homme adulte à $0^m,63$:

Chez la femme à $0^m,50$;

2° Dans les deux sexes (la jambe gauche étant à l'appui), le membre inférieur droit forme un pas plus long que le membre inférieur gauche (la jambe droite étant à l'appui), en un mot, le pas droit est plus grand que le gauche ;

3° L'écartement latéral des pieds, ou base de sustentation, mesure en moyenne, chez l'homme en marche, 11 à 12 centimètres, avec prédominance de 1 centimètre pour l'écartement latéral gauche. Il mesure en moyenne, chez la femme en marche, 12 à 13 centimètres, avec prédominance de 1 centimètre pour l'écartement latéral gauche ;

4° La somme des angles ouverts en avant et en haut par l'intersection de la ligne d'axe des pieds avec la ligne de marche égale, en moyenne, 31 à 32° avec prédominance d'ouverture de 1 degré pour le pied droit. Chez la femme en marche, cette somme égale, en moyenne, 30 à 31°, avec prédominance d'ouverture de 1 à 2 degrés pour le pied droit.

Récemment, M. A.-M. Bloch a fait connaître un nouveau procédé pour l'étude de la marche normale et pathologique et qui consiste dans le moulage des empreintes laissées par les pieds sur un sable fin et mouillé. Mais il n'a pas encore fait connaître le résultat de ses recherches (1).

Vitesse des allures de l'homme; rapports de la fréquence à la longueur du pas. — Chez un homme qui marche ou qui court, la vitesse est le produit de deux facteurs : le nombre et la longueur des pas effectués en un temps donné.

D'après les frères Weber, la longueur du pas augmenterait avec sa fréquence, le pas lent étant plus court que le pas à cadence rapide. Si cette loi était absolue, il suffirait, pour accélérer la marche d'un corps de troupe, de précipiter la cadence du tambour ou du clairon qui règle la fréquence du pas. Mais les expériences de M. Marey ont montré que la loi des frères Weber n'est vraie que jusqu'à une limite, à partir de laquelle l'accélération de la cadence amène le raccourcissement du pas et bientôt la diminution de la vitesse de l'allure.

Voici comment ces expériences ont été faites : M. Marey a établi à la Station physiologique une piste circulaire et parfaitement horizontale de 500 mètres de longueur. Tout le long de cette piste règne une ligne télégraphique dont les poteaux, espacés de 50 mètres les uns des autres, portent un petit appareil qui rompt un instant le circuit de la ligne quand le marcheur passe devant le poteau. A l'intérieur du laboratoire, un appareil inscripteur, l'odographe fixe, est en communication avec la ligne télégraphique. Dans cet appareil (fig. 167), un style trace sur le papier qui recouvre un cylindre tournant une ligne horizontale. Mais chaque fois que le marcheur, passant devant un des poteaux, rompt un instant le circuit, le style inscripteur se déplace un instant suivant la génératrice du cylindre, ce qui produit, dans la courbe, une inflexion à angle droit. Et comme ces inflexions se répètent chaque fois

(1) Bloch, *Société de biologie*, 12 déc. 1896.

que le marcheur a arcouru 50 mètres et passe devant un des poteaux, il s'ensuit qu'au bout d'un certain temps l'odographe aura tracé une courbe en zigzags (*a*, fig. 168), sur laquelle se lira la vitesse de la marche.

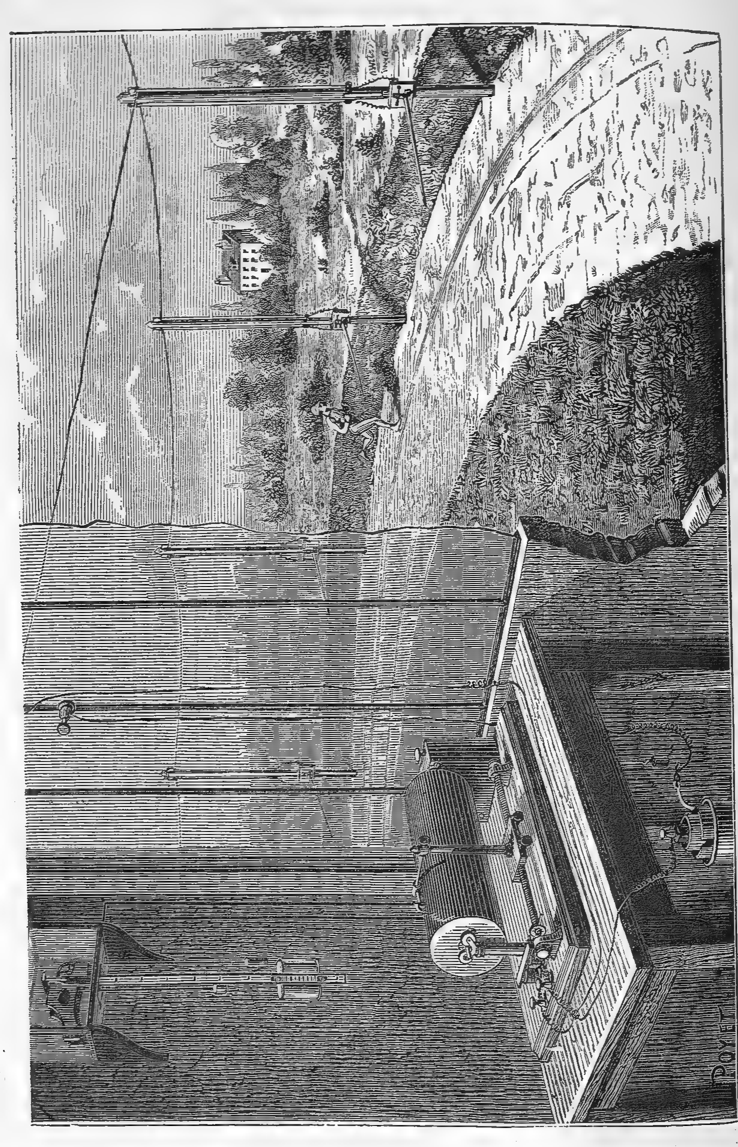


Fig. 167. — Disposition de l'odographe fixe et de la piste à la Station physiologique (Marey).

En effet, sur la courbe sinueuse de l'odographe, les temps se mesurent suivant les divisions horizontales de l'axe des abscisses, de 0 à 16 minutes. Les espaces parcourus se comptent en mètres sur l'axe des ordonnées. De sorte que pour chaque point de la courbe sinueuse on estime, d'après les intersections des divisions verticales et horizontales, le temps écoulé et l'espace parcouru. Le rapport de ces deux valeurs exprime la vitesse.

Au lieu de la ligne sinueuse *a* tracée par l'odographe, il est mieux de tirer une droite tangente à tous les sommets des angles d'un côté. Ces lignes (*a. b. d...i*) traduisent par leur pente la vitesse des différentes allures ; elles expriment une vitesse uniforme quand elles sont rectilignes, une vitesse variable si elles sont infléchies.

Jusqu'ici nous ne connaissons que la vitesse de l'allure, avec les deux

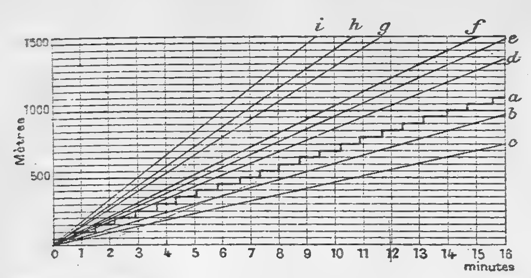


Fig. 168. — Tracés de l'odographe fixe pour les allures de vitesse différentes (Marey).

facteurs, les temps écoulés et les chemins parcourus à chaque point de la courbe ; il importe, pour notre problème, de connaître le nombre des pas. A cet effet, nous avons, dit M. Marey, disposé au centre de la piste un timbre qui sonne, d'une cadence régulière, et sur lequel le marcheur règle son pas. Cette sonnerie, commandée par un pendule à longueur variable situé dans le laboratoire, peut prendre toutes les fréquences possibles depuis 40 jusqu'à 120 coups à la minute.

Étant connue la cadence à laquelle marchait un homme on peut, dans la

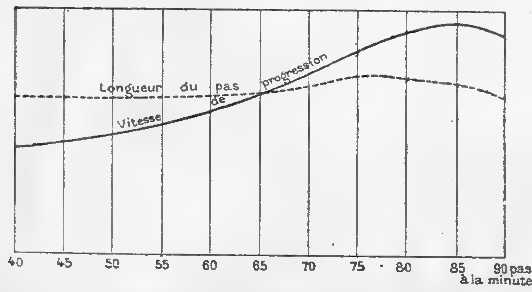


Fig. 169. — Courbes de la vitesse et de la longueur du pas à différentes cadences (Marey).

courbe de l'odographe, substituer à la valeur du temps écoulé le nombre des pas effectués, et, en divisant par ce nombre l'espace parcouru, avoir la longueur moyenne du pas.

C'est d'après ces données qu'a été dressé le tableau (fig. 169) où l'on voit que, suivant la remarque des frères Weber, la longueur du pas augmente avec l'accélération de la cadence, de 40 à 75 pas à la minute ; mais pour des cadences plus rapides la longueur du pas décroît, et enfin la vitesse elle-même diminue à partir de 85 pas à la minute. Cela veut dire que le rac-

courcissement des pas est devenu tel que, malgré l'augmentation de leur nombre, l'espace parcouru en un temps donné a diminué.

B. — Des mouvements des différentes parties du corps dans la marche.

Il est nécessaire, pour la commodité de la description, de distinguer plusieurs phases dans le double pas.

Il est un moment où, les deux jambes étant écartées à la manière d'un compas, les deux pieds reposent à la fois sur le sol, l'un par le talon, l'autre par la pointe. C'est la période de double appui (fig. 170 et fig. 171).

Pas simple postérieur. Pas simple antérieur.
Double pas.

Fig. 170. — Un double pas. La jambe portante est figurée par des traits pleins, la jambe oscillante par des traits pointillés.

Puis, le pied qui est en arrière quitte le sol pour se porter en avant. A ce moment, le corps ne repose plus que sur un pied; c'est la période d'appui unilatéral. Cette période est beaucoup plus longue que la première.

La marche se compose donc d'une succession de doubles appuis et d'appuis unilatéraux alternativement droits et gauches. Dans la phase d'appui unilatéral, une des jambes, celle qui porte sur le sol (ou jambe portante) exécute dans son ensemble un mouvement de rotation dont le centre est au pied et la circonférence à la hanche, pendant que la jambe qui se meut (ou jambe oscillante) décrit un mouvement analogue, mais en sens opposé, le centre de rotation se trouvant à la hanche. Mais il faut ajou-

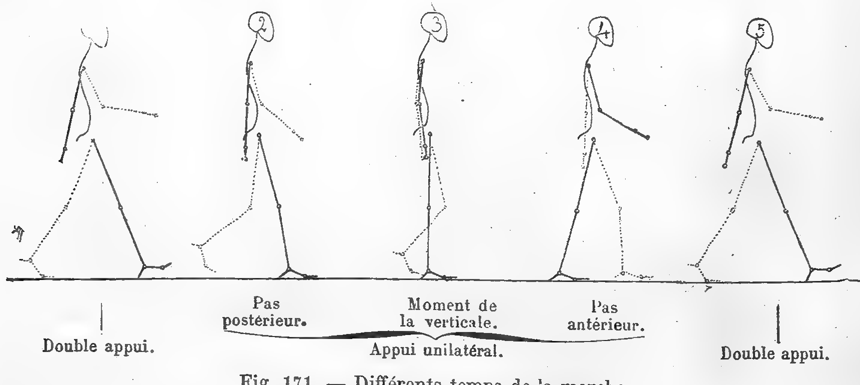


Fig. 171. — Différents temps de la marche.

ter que ce dernier centre subit en même temps un déplacement en avant, conséquence du mouvement de la jambe portante.

Dans ce double mouvement qu'exécutent simultanément la jambe por-

tante et la jambe oscillante, il arrive un moment où la jambe portante passe par la verticale, la jambe oscillante la croisant vers ce même moment, pour devenir antérieure, de postérieure qu'elle était. Ce moment, que je désignerai sous le nom de moment de la verticale ou moment de passage, nous servira pour diviser la période d'appui unilatéral en deux phases ; une première phase, ou pas postérieur, est celle qui précède le moment de la verticale. Dans cette phase, le membre portant est oblique en haut et en arrière, le membre oscillant est postérieur. La deuxième phase, ou pas antérieur, est celle qui suit le moment de la verticale : la jambe portante est oblique en sens inverse, c'est-à-dire en haut et en avant, et la jambe oscillante est antérieure.

Ainsi donc, ces diverses phases du double pas se succèdent dans l'ordre suivant (fig. 171) :

1° Période du double appui ;

2° Pas postérieur ;
3° Moment de la verticale ;
4° Pas antérieur ;
} Période de l'appui unilatéral.

Ces distinctions nous seront d'un grand secours dans les descriptions qui vont suivre.

Nous étudierons successivement les mouvements des membres inférieurs, du torse et des membres supérieurs.

I. — MOUVEMENTS DES MEMBRES INFÉRIEURS

1° ***Période du double appui.*** — Pendant cette période, les deux pieds portent à la fois sur le sol, mais ils ne le touchent jamais dans toute leur longueur en même temps. On peut même dire qu'il est fort rare qu'un seul pied pose sur le sol dans toute son étendue, alors que l'autre y touche encore si légèrement que ce soit, ou, si cela se produit, c'est pendant un temps extrêmement court.

En effet, au moment où le pied qui est en avant va toucher le sol par le talon, le pied qui est en arrière s'est déjà soulevé partiellement, et le talon s'est détaché du sol. Au milieu de la période de double appui, tout le corps porte de manière très manifeste sur le talon d'un pied et sur les doigts de l'autre. Puis, le pied qui est en avant abaisse sa pointe et prend contact avec le sol dans toute son étendue, en même temps que le pied qui est en arrière se fléchit progressivement dans ses articulations métatarso-phalangiennes et que la surface d'appui diminue de plus en plus, de telle manière que, lorsque l'appui sur le pied antérieur est complet, c'est-à-dire lorsque les doigts reposent aussi fortement sur le sol que le talon, le pied postérieur est bien près de s'en détacher, si ce n'est déjà chose faite.

En résumé, dans la période du double appui, les deux pieds se déroulent sur le sol, du talon à la pointe, l'un pour le quitter, l'autre pour s'y appliquer, avec cette particularité que ces deux mouvements ne sont pas absolument simultanés et que le premier a déjà commencé lorsque le dernier se produit.

Pendant cette période, les deux jambes ne sont pas en extension complète; elles sont très légèrement fléchies, mais la jambe postérieure l'est à un degré plus marqué.

2° *Période de l'appui unilatéral.* — La **jambe portante** arrive au contact du sol par le talon et en extension complète. Plus tard, lorsque le pied est complètement appuyé, le genou se fléchit légèrement, puis il s'étend à nouveau progressivement de manière à se rapprocher de l'extension, qui est presque complète au moment de la verticale. Ensuite cette extension s'exagère pendant tout le pas antérieur et ne cesse que tout à la fin, de manière à se transformer en légère flexion pendant la période du double appui. Cette flexion ne fait que s'exagérer pendant le double appui jusqu'au moment où le membre va devenir oscillant.

Jambe oscillante. — Au moment où la jambe va devenir oscillante, le genou est donc fléchi, et cette flexion s'exagère pendant toute la durée du pas postérieur pour diminuer au moment de la verticale et pendant tout le pas antérieur, à la fin duquel elle arrive en extension pour se transformer de nouveau en jambe portante.

Si nous considérons à un même moment les attitudes respectives des deux membres inférieurs, nous voyons que, pendant le pas postérieur, les deux jambes sont fléchies, mais à un degré bien différent, la jambe portante l'étant fort peu. Au moment de la verticale, la jambe portante est en extension et la jambe oscillante, qui la croise, est fléchie. Pendant le pas antérieur, le contraste persiste dans le même sens jusque tout à la fin, où pendant un court moment, la jambe oscillante s'étendant complètement avant que le talon touche le sol, les deux membres sont en extension complète.

II. — MOUVEMENTS DU TORSE

Le mouvement le plus important est le mouvement de translation, qui est, en définitive, le but de la marche. Nous avons vu que M. Marey a montré que la vitesse de ce mouvement n'est pas uniforme et subit une accélération vers la fin de chaque double pas.

Ce mouvement se combine avec d'autres qui sont les suivants :

1° *Oscillations verticales.* — A chaque pas le torse tout entier subit un soulèvement suivi d'abaissement, et les deux mouvements constituent une oscillation dans le sens vertical, dont l'amplitude est de 3 à 4 centimètres. Il se produit une oscillation pour chaque double pas, de telle manière que chaque point du torse ou de la tête décrit dans l'espace, pendant la marche, une ligne régulièrement ondulée. Les minima correspondent aux périodes de double appui et sont la conséquence forcée de l'obliquité qu'affectent à ce moment les deux membres inférieurs. Les maxima se produisent au moment de la verticale, c'est-à-dire au moment où le membre inférieur portant, d'oblique qu'il était au double appui, devient perpendiculaire au sol.

2° *Oscillations transversales ou horizontales.* — En même temps que le torse se soulève et s'abaisse, il se porte d'un côté sur l'autre, et ce mouvement de va-et-vient latéral constitue ce qu'on appelle les oscillations

transversales ou horizontales. Elles sont la conséquence du transport du corps du côté de la jambe portante, dont le but est de rapprocher le centre de gravité de la base de sustentation. C'est donc au milieu de l'appui unilatéral que se produit le maximum d'amplitude de l'oscillation. Ces oscillations transversales sont en nombre double de celui des oscillations verticales.

3° ***Mouvements d'inclinaison en avant et en arrière.*** — Bien que fort peu marqués dans la marche ordinaire, ces mouvements n'en existent pas moins. Si l'on considère l'axe du torse aux différentes phases du pas, on voit que, pendant le pas postérieur, le corps est penché en arrière, qu'il l'est en avant pendant le pas antérieur, et qu'au moment de la verticale et des doubles appuis, il est sensiblement vertical.

4° ***Mouvements de torsion.*** — Ces mouvements sont la conséquence des mouvements contrariés des épaules et des hanches qu'il est opportun d'étudier maintenant.

5° ***Mouvements du bassin.*** — En outre de la translation et des oscillations verticales et horizontales déjà étudiées à propos des mouvements du tronc dans son ensemble, le bassin est soumis à deux sortes de mouvements qui se passent autour de deux axes : l'axe antéro-postérieur et l'axe vertical.

a. Rotation autour d'un axe vertical. — Dans le pas postérieur, la face antérieure du bassin est tournée du côté de la jambe oscillante, pour se porter du côté opposé lors du pas antérieur. Au moment même de la verti-

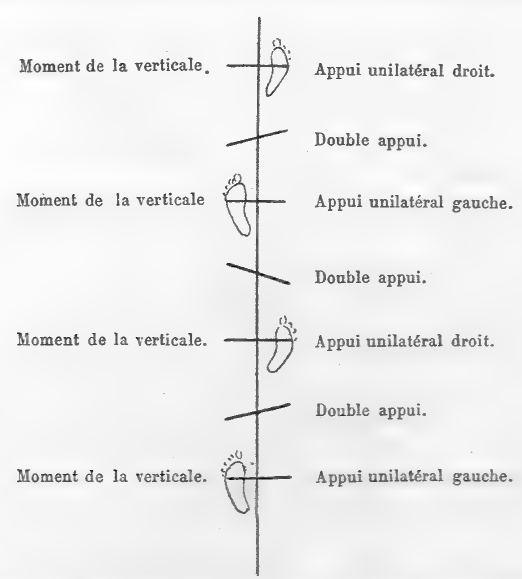


Fig. 172. — Projection sur plan horizontal de l'axe des hanches aux différents temps de la marche.

cale, le bassin est parfaitement perpendiculaire à la ligne de marche (fig. 172). Ce mouvement est une conséquence inévitable de l'écartement des deux

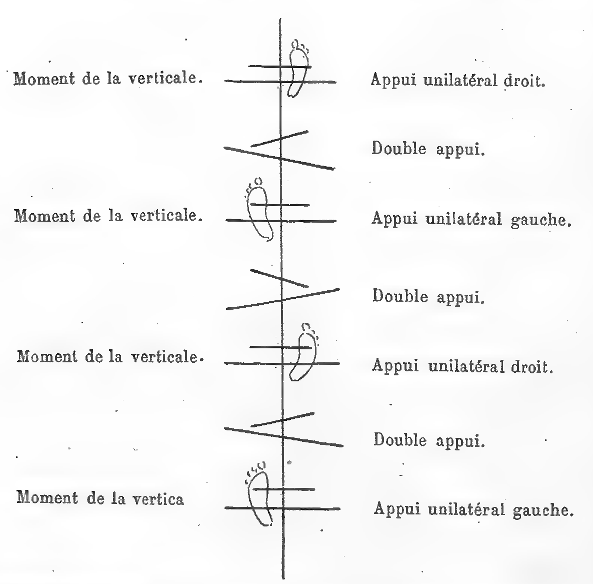
membres inférieurs, celui qui est en arrière retenant la hanche à laquelle il est attaché, celui qui est en avant entraînant avec lui la hanche qui lui correspond.

Le centre de ce mouvement paraît être à l'articulation coxo-fémorale de la jambe portante, pendant que l'articulation de la jambe oscillante occupe la périphérie.

b. ROTATION AUTOUR D'UN AXE ANTÉRO-POSTÉRIEUR. — A la période de double appui, alors que, comme nous venons de le voir, l'axe transverse du bassin est le plus oblique par rapport à la ligne de marche, le même axe paraît bien horizontal, c'est-à-dire que les deux articulations coxo-fémorales semblent situées à la même hauteur. Mais aussitôt que la jambe quitte le sol, le bassin incline manifestement de ce côté, puis se relève et devient presque horizontal au moment de la verticale, puis enfin redescend encore toujours du même côté jusqu'à ce que le double appui se reproduise et le ramène à l'horizontale. Le centre du mouvement serait encore l'une des articulations coxo-fémorales, celle du côté de la jambe portante. Ces divers mouvements du bassin s'observent très nettement sur des chronophotographies qui représentent l'homme marchant vu de face.

En somme, *jamais le côté oscillant du bassin ne s'élève au-dessus du niveau du côté portant. Il ne fait que baisser très nettement dans le pas postérieur, un peu moins nettement dans le pas antérieur.*

6° ***Mouvements des épaules.*** — Le mouvement de rotation du bassin



Fig, 173. — Projection sur plan horizontal de l'axe des hanches et de l'axe des épaules aux différents temps de la marche.

autour d'un axe vertical, que nous avons signalé il n'y a qu'un instant, entraînerait forcément tout le torse dans le même sens, si un mouvement de

rotation des épaules en sens inverse ne venait le contrarier et maintenir la rectitude du torse.

Il existe donc, entre la ligne des épaules et la ligne des hanches, un défaut de parallélisme aux différents temps de la marche, se produisant de la façon suivante :

C'est à la période du double appui que l'angle formé par l'axe des épaules et par celui des hanches est le plus considérable.

Au moment de la verticale, ils sont parallèles.

Si l'on songe que ces deux axes ne sont pas dans le même plan vertical, mais que le plan des épaules est toujours postérieur à celui des hanches, on voit de suite comment leur rotation en sens inverse a pour effet de rapprocher l'une de leurs extrémités en éloignant l'autre, de telle sorte que, dans le pas postérieur, la plus grande ouverture se trouve du côté de la jambe portante, pendant que du côté de la jambe oscillante le plan des épaules se rapproche de celui des hanches. C'est l'inverse dans le pas antérieur (fig. 173). Le mouvement de rotation de l'axe des épaules est la conséquence des mouvements de balancement des membres supérieurs.

7° ***Mouvements d'inclinaison latérale.*** — Enfin, il faut encore signaler, au nombre des mouvements qu'exécute le torse pendant la marche, un mouvement d'inclinaison latérale qui penche le haut du torse du côté de la jambe portante.

Cette inclinaison latérale a pour effet d'abaisser l'épaule correspondante pendant que l'autre épaule s'élève. Elle atteint son maximum d'amplitude au moment de la verticale.

Le redressement s'opère pendant la phase du double appui.

Puis l'inclinaison se reproduit de l'autre côté. Ces mouvements d'inclinaison latérale ne sont pas sans analogie avec ce qui a lieu pendant la station hanchée.

8° ***Mouvements des membres supérieurs.*** — Les mouvements des membres supérieurs s'opèrent en sens inverse de ceux des membres inférieurs. Quand la jambe droite, par exemple, est en arrière, le bras droit est en avant et *vice versa*. Ils consistent en des oscillations pendulaires dans le plan antéro-postérieur. Nous verrons plus loin qu'ils sont sous la dépendance d'actions musculaires.

Au moment du double appui, ils subissent leur plus grand écartement. Au moment de la verticale, ils se rapprochent tous deux du même plan transversal, alors que leur direction se croise.

Dans la moitié postérieure de son oscillation, le membre supérieur est complètement étendu ; dans la moitié antérieure, il se fléchit légèrement au coude en même temps que la main se porte en dedans.

Telle est la description aussi complète que possible des mouvements de ce qu'on pourrait appeler la marche type, c'est-à-dire la marche à vide, réduite à ses seuls éléments constitutifs, abstraction faite de toute circonstance qui la puisse modifier.

C'est dire qu'il peut exister de nombreuses variétés de la marche. Nous en dirons quelques mots plus loin.

C. — Description des mouvements de la course.

La course, comme la marche, est un mode de progression dans lequel le corps est alternativement soutenu par l'un des membres inférieurs dont les appuis se succèdent à intervalles égaux. Mais elle en diffère en ce que les phases d'appui unilatéral n'empiètent pas l'une sur l'autre, et qu'elles sont, au contraire, séparées par un intervalle pendant lequel le corps est complètement suspendu en l'air. Il n'y a pas, dans la course, de phase de double appui.

Il y a donc lieu de distinguer dans la course deux phases qui se succèdent régulièrement : la phase d'appui unilatéral et la phase de suspension, chaque phase d'appui unilatéral étant alternativement droite et gauche.

1° ***Mouvements des pieds.*** — Le pied arrive à l'appui non plus, comme dans la marche, par le talon, mais par la plante même. Cette assertion nous paraît suffisamment proche de la vérité pour être admise. Sur les photographies instantanées, en effet, on voit que le pied, au moment où il va toucher le sol, se présente non plus la pointe en l'air, mais son grand axe parallèle au sol ou bien très légèrement incliné en bas du côté du talon, les doigts se trouvant toujours un peu relevés, de telle sorte que, si l'on admet que le pied frappe le sol par le talon en premier lieu, le reste de la plante suit si rapidement que le contact du pied dans toute son étendue avec le sol peut être considéré comme instantané. Il existe cependant des cas que l'on doit considérer comme exceptionnels, dans lesquels le pied aborde le sol par la pointe. Nous l'avons très nettement observé sur les chronophotographies que nous avons prises, non plus sur un coureur passant devant l'objectif, mais sur des groupes de coureurs saisis au passage dans des concours de courses au *Racing-club*. Une fois appuyé sur le terrain, le pied s'y déroule de la même manière que dans la marche. C'est le talon qui se lève le premier et le gros orteil quitte le dernier le contact avec le sol.

Pendant la phase de suspension, le pied d'abord étendu sur la jambe (la pointe en bas) revient peu à peu à la position intermédiaire entre la flexion dorsale et l'extension plantaire, et ne la dépasse guère.

2° ***Mouvements des membres inférieurs.*** — Nous avons vu que, dans la marche, la jambe portante arrive au sol en extension, et que l'extension se reproduit à un autre moment de la phase d'appui. Dans la course, à aucun moment le membre inférieur n'est en extension. Il y a toujours flexion, mais à des degrés divers.

Au moment où le pied touche le sol, la jambe est fléchie ; elle se redresse légèrement lorsqu'elle passe aux environs de la verticale, pour se fléchir davantage au moment où, par une sorte de détente, elle pousse le corps en avant immédiatement avant de quitter le sol.

Lorsque le pied quitte le sol, le membre est voisin de l'extension. Mais aussitôt la flexion augmente, au point que les deux segments, cuisse et jambe, forment un angle aigu au moment où ce membre croise la direction du membre portant. A partir de ce moment, la flexion décroît, la jambe

s'allongeant de plus en plus avant de reprendre contact avec le sol et de commencer un nouvel appui.

Avec la rapidité de la course, la durée des phases de suspension augmente et celle des phases d'appui diminue. Le pied repose à peine à terre, juste le temps de donner au corps l'impulsion.

3° ***Mouvements du torse.*** — Comme dans la marche, le torse subit, en outre du mouvement de translation, des oscillations verticales et horizontales.

Les oscillations verticales se produisent de telle sorte que les minima de la courbe que décrit un point du corps, le vertex ou le pubis, par exemple, correspondent à la phase d'appui, pendant que les maxima coïncident avec la phase de suspension.

Les oscillations horizontales existent comme dans la marche, et résultent de ce que le centre de gravité se rapproche, pendant la phase d'appui, du pied qui est à terre.

Ces oscillations verticales et horizontales diminuent d'amplitude avec la rapidité de la course.

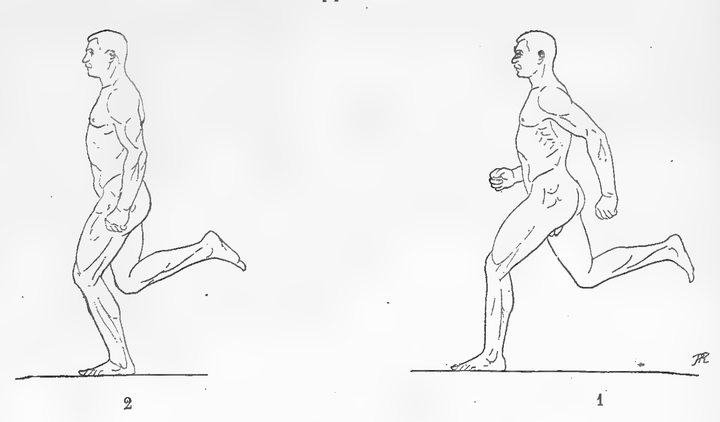
Le torse présente, en outre, comme dans la marche, des mouvements de rotation et d'inclinaison. Les plus accentués sont les mouvements d'inclinaison dans le sens antéro-postérieur, qui prennent une bien plus grande importance que dans la marche. On peut constater en effet que, pendant la période d'appui, le corps est fortement incliné en avant, tandis qu'il se redresse pendant la suspension.

4° ***Mouvements des membres supérieurs.*** — Comme dans la marche, ces mouvements consistent en oscillations alternatives et en sens inverse du mouvement des membres inférieurs. Elles n'en diffèrent que par leur amplitude plus considérable et par la flexion plus accentuée du coude. Le membre même ne s'étend jamais complètement, comme il arrive dans la marche, au moment postérieur de l'oscillation.

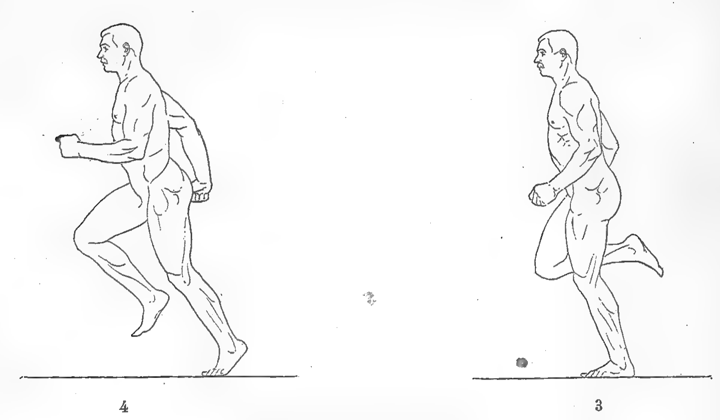
Du centre de gravité dans la course. — Dans la course, bien plus encore que dans la marche, le corps est dans un équilibre perpétuellement instable, sans cesse détruit, sans cesse rétabli. Ce n'est que pendant un espace de temps relativement court que la ligne de gravité passe par la base de sustentation, c'est-à-dire par la surface couverte par le pied portant. A ce moment (fig. 174, *3*), qui correspond au milieu de la phase d'appui, la jambe portante est fléchie légèrement et l'articulation de la hanche est située verticalement au-dessus du cou-de-pied. Mais le torse est fortement incliné en avant, et tend à déplacer la ligne de gravité dans ce sens. Il est important de remarquer qu'à ce moment le membre oscillant très fléchi croise la direction du membre portant.

A aucun autre moment, alors que les deux membres inférieurs sont écartés l'un de l'autre diversement fléchis, si l'un des pieds touche le sol, la ligne de gravité ne passe par la base de sustentation, c'est-à-dire par la surface que couvre le pied posant à terre.

Phase d'appui unilatéral.



Suite de la phase d'appui unilatéral.



Phase de suspension.

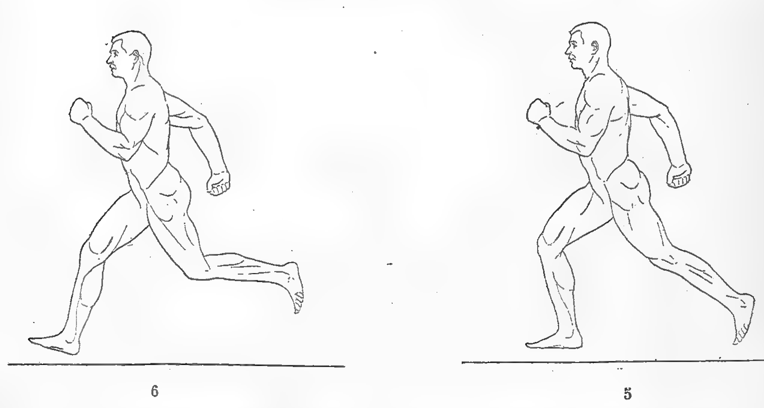


Fig. 174. — Figures demi-schématiques de six positions successives d'un double pas dans la course.

D. — Du rôle des muscles dans la locomotion.

a) Pendant la marche.

On a cru pendant longtemps, sur la foi des frères Weber, que toute l'action musculaire pendant la marche se concentrait sur le membre portant destiné à soutenir seul toute la charge du torse, et que le membre oscillant exécutait son oscillation sous la seule influence de la pesanteur, à la manière d'un pendule. Il est bien démontré aujourd'hui, depuis les travaux de M. Marey, de Carlet, de Duchenne (de Boulogne) et de Boudet (de Paris), que la jambe oscillante est essentiellement active, et que ses mouvements ne sauraient s'exécuter sans le concours de la contraction musculaire ; il suffit de regarder un homme qui marche pour s'en convaincre. Nous examinerons d'abord l'action musculaire sur le membre inférieur, au moment où il touche terre du talon, pour devenir membre portant, et nous suivrons les modifications qu'elle subit pendant les diverses phases du pas, pour continuer notre étude sur le même membre, au moment où il va devenir oscillant, puis pendant toutes les phases de son oscillation (fig. 175 et 176).

1° ***Membre portant.*** — Projeté en avant par une action musculaire que nous étudierons plus loin, le membre oscillant retombe pour ainsi dire sur le sol par le seul effort de la pesanteur. A ce moment, il est dans un état de relâchement musculaire à peu près complet. Mais aussitôt qu'il commence à supporter le poids du corps, avant même que le pied ne touche le sol dans toute son étendue, la contraction musculaire s'y révèle. Le moyen fessier commence à se contracter, et sa contraction énergique se maintiendra tout le temps de l'appui unilatéral, pour empêcher le bassin, auquel est suspendu le membre qui oscille, de basculer latéralement. Le moyen fessier et probablement aussi le petit fessier, situé au-dessous du moyen, sont les agents directs qui s'opposent à la chute latérale du bassin; leur action est secondée par la contraction simultanée de deux autres muscles qui sont la partie supérieure du grand fessier et le tenseur du fascia lata.

Le grand fessier, d'ailleurs, se contracte dans son entier pendant toute la durée du pas postérieur et empêche ainsi le tronc de basculer en avant. Mais son action cesse généralement au moment de la verticale et ne se produit pas pendant le pas antérieur. La contraction du grand fessier est bien plus évidente si l'on marche le corps penché en avant. Elle devient inutile si l'on marche le corps renversé en arrière.

Le gros muscle de la cuisse, le quadriceps, est également un des premiers muscles qui se contractent sur la jambe portante. Il maintient l'extension du membre qui, sans lui, fléchirait sous le poids, mais sa contraction ne dure que pendant le pas postérieur, elle diminue au moment de la verticale pour cesser complètement ensuite pendant la durée du pas antérieur. A ce moment, en effet, la ligne de gravité du torse passant bien en avant de l'articulation du genou, la pesanteur suffit à maintenir l'extension de l'article.

Quant aux muscles de la jambe, ils sont tous légèrement tendus pendant

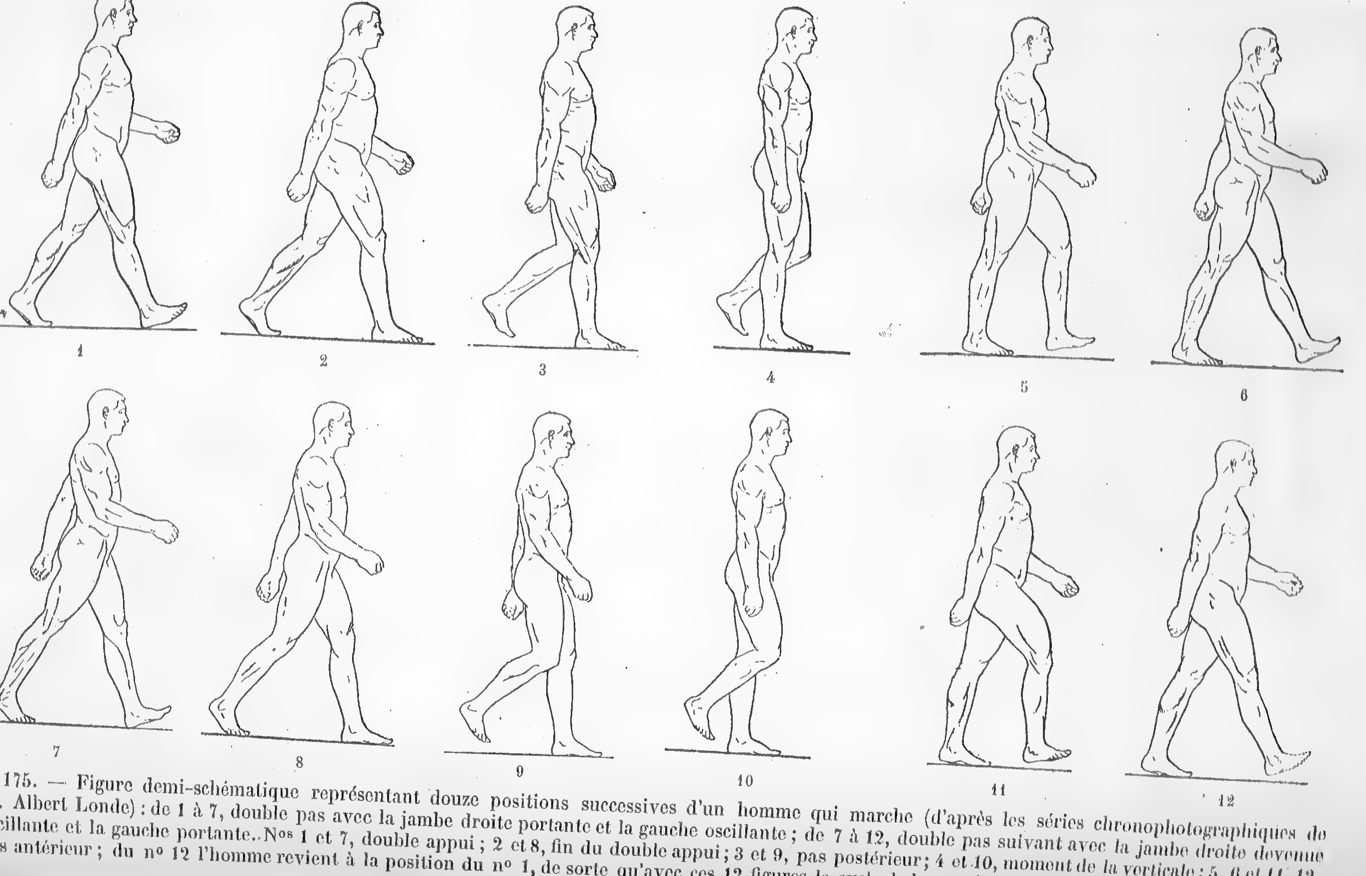


Fig. 175. — Figure demi-schématique représentant douze positions successives d'un homme qui marche (d'après les séries chronophotographiques de M. Albert Londe) : de 1 à 7, double pas avec la jambe droite portante et la gauche oscillante ; de 7 à 12, double pas suivant avec la jambe droite devenue oscillante et la gauche portante.. Nos 1 et 7, double appui ; 2 et 8, fin du double appui ; 3 et 9, pas postérieur ; 4 et 10, moment de la verticale ; 5, 6 et 11, 12, pas antérieur ; du n° 12 l'homme revient à la position du n° 1, de sorte qu'avec ces 12 figures le cycle de la marche est complet.

tout le pas postérieur. Mais à peine la verticale est-elle franchie que les muscles postérieurs et latéraux se contractent vigoureusement et leur contraction augmente d'intensité jusqu'à la fin.

Le muscle du mollet soulève énergiquement le talon qui quitte le sol, et pousse en même temps tout le corps en haut et en avant. C'est lui le véritable agent de propulsion. Mais, dans ce mouvement, la voûte du pied tendrait à s'affaisser si elle n'était maintenue par l'action des muscles péroniers latéraux.

Les muscles postérieurs de la cuisse, qui sont les fléchisseurs de la jambe, commencent à entrer en contraction sur la jambe portante pendant le pas antérieur. Leur contraction s'accentue de plus en plus et a pour effet de fléchir la jambe aussitôt que celle-ci a quitté le sol.



Fig. 176. — Marche sur plan horizontal. — Moment du double appui. Les orteils du pied gauche n'ont pas encore pris entièrement contact avec le sol (d'après une phot. inst. de M. Londe)

2° ***Membre oscillant.*** — Voici donc que la jambe, de portante qu'elle était, devient oscillante. A ce moment, le muscle gastrocnémien et les péroniers se relâchent, et en même temps les extenseurs des orteils et le jambier antérieur se contractent pour soulever la pointe du pied, et l'empêcher, dans le mouvement d'oscillation qui va se produire, de heurter le sol.

A la cuisse, les fléchisseurs de la jambe sont contractés pour maintenir la jambe en flexion. Le triceps fémoral est relâché, ainsi que les fessiers. Mais les fléchisseurs de la cuisse sur le bassin, parmi lesquels le couturier et le droit antérieur, se contractent dans le but de ramener la cuisse et tout le membre en avant. La jambe oscillante exécute ainsi le pas postérieur, passe la verticale et s'avance pour accomplir le pas antérieur. C'est à ce moment qu'une contraction énergique du quadriceps étend vigoureusement la jambe sur la cuisse. Mais cette contraction est rapide et cesse brusquement avant même que le membre soit en extension complète. Le gonflement que l'on observe alors est l'indice, non de la contraction, mais du relâchement du muscle, comme nous le montrerons tout à l'heure.

Nous retrouvons là un de ces exemples de contraction balistique que nous avons étudiés plus haut. Lors donc que l'extension est produite, le quadriceps et les autres muscles du membre sont dans le relâchement. Le membre descend alors de son propre poids jusqu'à la rencontre du talon avec le sol.

D'autres actions musculaires se montrent sur le reste du corps. Je signalerai seulement les spinaux, qui entrent en contraction du côté de la jambe

oscillante seulement, et le deltoïde, dont les contractions des faisceaux antérieurs et postérieurs tiennent sous leur dépendance les mouvements des membres supérieurs.

Nous trouverons, dans l'étude des formes extérieures, la démonstration des actions musculaires que nous venons d'indiquer.

Formes des fesses. — Ce qui caractérise la forme des fesses dans la marche, c'est la saillie constituée du côté de la jambe portante par le moyen fessier et la partie supérieure du grand fessier, saillie qui occupe toute la moitié supérieure de la fesse de ce côté, et qu'accentue la dépression rétro-trochantérienne qui l'accompagne. La fesse du côté de l'oscillation est, au contraire, aplatie dans toute son étendue.

Formes des cuisses. — Les deux cuisses, pendant la marche, offrent un contraste frappant, dû en particulier aux états physiologiques différents du muscle quadriceps sur les deux jambes à un même moment.

D'autre part, il y a dans les formes de chaque membre même opposition complète entre le pas postérieur et le pas antérieur.

Sur le membre portant, au moment où il a pris franchement contact avec le sol, la contraction du triceps fémoral est énergique. On remarque l'accentuation du sillon latéral externe de la cuisse et la séparation fort nette des masses charnues du droit antérieur, du vaste externe et du vaste interne. Cette contraction est en somme une contraction statique; elle maintient le membre en flexion légère et résiste à l'action de la pesanteur qui entraînerait la flexion complète sur un membre abandonné à lui-même. Cette contraction dure tout le temps du pas postérieur. Elle cède peu à peu pour faire place au relâchement complet qui existe pendant toute la durée du pas antérieur. Ce relâchement du quadriceps se traduit extérieurement par la production du bourrelet sus-rotulien occasionné par la saillie de l'extrémité inférieure du vaste interne relâché. L'extrémité inférieure du vaste externe relâché amène aussi la production du relief caractéristique (1). Mais toute la masse musculaire est refoulée latéralement par la tension du fascia lata et de la bandelette iléo-fémoro-tibiale. En somme, la cuisse à ce moment est étroite transversalement et ressemble assez à la cuisse de la jambe portante de la station hanchée.

Pendant que le muscle quadriceps se relâche, on voit progressivement s'accentuer le relief des muscles postérieurs de la cuisse dont la contraction commence pendant le pas antérieur.

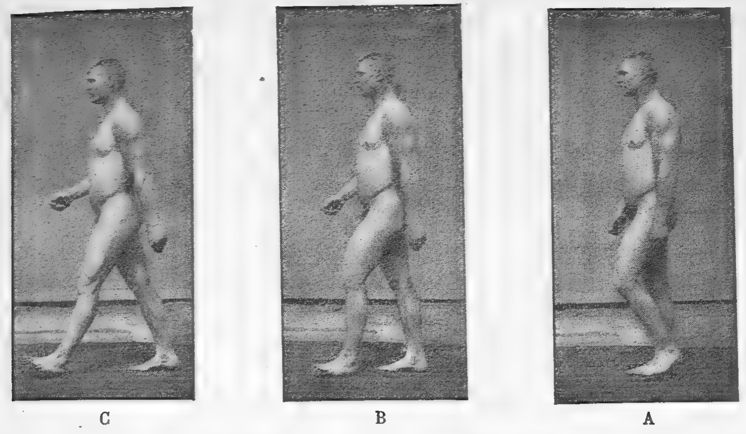
Lorsque le membre a quitté le sol, on constate, dès le début de son oscillation, les reliefs formés par les muscles fléchisseurs de la cuisse, droit antérieur, couturier et tenseur du fascia lata, en même temps qu'à la partie postérieure de la cuisse les fléchisseurs de la jambe forment une saillie fort distincte. Ces formes sont en somme celles du membre oscillant pendant le pas postérieur. Mais les choses changent au moment de la verticale et, pendant le pas antérieur, les formes de la cuisse sont extrêmement curieuses à étudier.

C'est le moment où la contraction des fléchisseurs de la jambe cesse, et, des muscles postérieurs de la cuisse, la contraction passe au muscle anté-

(1) Voy. dans mon *Anatomie artistique*, p. 231, la signification morphologique du bourrelet sus-rotulien.

rieur, au muscle quadriceps, qui tient sous sa dépendance l'extension de la jambe qui se produit alors. Mais cette extension de la jambe est rapide et soudaine. Elle est produite par une contraction musculaire brusque cessant aussitôt.

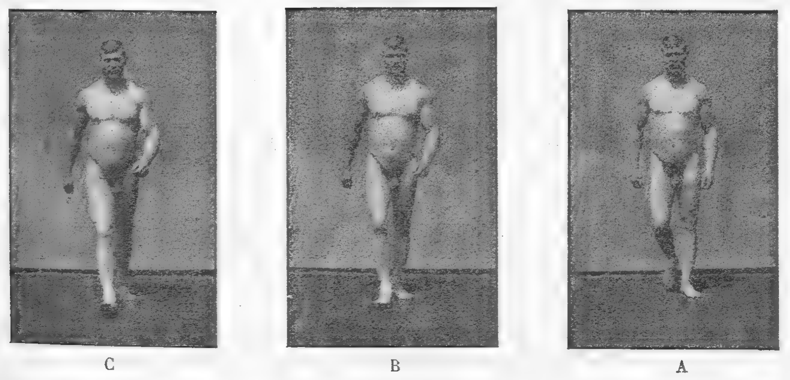
Cette contraction a lieu au moment de la verticale, alors que, la jambe se



C B A

Fig. 177. — Trois photographies instantanées successives prises pendant la marche (cliché A. Londe).

trouvant fléchie, le muscle est distendu, circonstance éminemment favorable à l'énergie de l'effort musculaire (fig. 177 et 178, A). Elle cesse vers le milieu du



C B A

Fig. 178. — Trois photographies instantanées successives prises pendant la marche (cliché A. Londe).

pas antérieur bien avant que la jambe ait achevé son mouvement d'extension. La photographie instantanée nous a permis de saisir le moment où cesse cette contraction. La forme de la cuisse est saillante en avant, fortement bombée, mais le modelé uniforme du muscle montre bien que le relâchement musculaire s'est déjà produit (fig. 177 et 178, B). Nous avons donc sur cette image un muscle relâché, mais soulevé, projeté en avant, pour ainsi dire, à la

manière d'une masse fluctuante, par le mouvement même du membre. D'ailleurs, cette masse inerte, pour ainsi dire, subissant la loi de la pesanteur, retombe bientôt sur elle-même, ce que la photographie instantanée nous montre le moment d'après, alors que l'extension de la jambe s'est complétée en vertu de l'impulsion acquise et de l'inertie du membre, et que le talon ne touche pas encore le sol. A ce moment, en effet, la cuisse est considérablement aplatie, son diamètre antéro-postérieur, tant accru tout à l'heure, a beaucoup diminué (fig. 177 et 178, C). Par contre, la cuisse s'est élargie transversalement par suite du refoulement ou plutôt de la chute des masses musculaires en bas et sur les côtés.

Nous saisissons ici, grâce à la chronophotographie, deux phases très distinctes du relâchement musculaire du quadriceps qui impriment à la cuisse une forme toute différente, bombée en avant ou aplatie, large d'avant en arrière ou transversalement.

A l'œil nu, ces phénomènes musculaires se traduisent sous la forme d'un véritable ballottement du muscle.

Formes de la jambe et du pied. — C'est sur la jambe portante, au moment où la jambe oscillante l'a dépassée, c'est-à-dire pendant le pas antérieur, que l'on voit la contraction des jumeaux accentuer les plans du mollet, en même temps que s'accuse le relief du soléaire et que se raidit le tendon d'Achille. Ces formes s'accentuent de plus en plus jusqu'au moment où le pied quitte le sol. Elles sont accompagnées de modifications de la face externe de la jambe, marquée de sillons longitudinaux dus à la contraction des péroniers.

Toutes ces formes s'éteignent alors que la jambe est devenue oscillante, le triceps sural devient mou et comme flottant.

Les surfaces qui répondent aux péroniers sont plus uniformes, mais, au même moment, de nouvelles saillies se montrent à la face antérieure du cou-de-pied et sur le dos du pied. Elles sont dues aux cordes tendineuses des muscles extenseurs du pied et des orteils.

b) Du rôle des muscles dans la course.

Lorsque le pied est arrivé en contact avec le sol, le quadriceps se contracte vigoureusement pour empêcher le genou de se fléchir sous le choc. Les muscles de la jambe antérieurs et postérieurs sont également contractés énergiquement pour immobiliser l'articulation tibio-tarsienne, et faire du membre tout entier un soutien résistant. Ces contractions persistent pendant que le corps, sous l'influence de la vitesse acquise, continue son mouvement de translation et que le membre portant, toujours fléchi, passe par la verticale, puis devient oblique en sens contraire. Mais la contraction s'accentue dans le gastrocnémien, et le talon, dans la seconde partie de la phase de soutien, commence à quitter le sol. Dans cette phase, on n'observe pas le relâchement du quadriceps, qui se trouve si accentué, dans la marche, à la phase correspondante. Mais de même que, dans la marche, les fléchisseurs de la jambe (muscles postérieurs de la cuisse) entrent dès ce moment en contraction, de même ils forment ici un relief très distinct, et leur contraction se continue pendant la

première partie de la phase de suspension, pendant laquelle le membre qui vient de quitter le sol exécute une oscillation absolument comparable à ce qui se passe pendant la marche. Les différences consistent dans une amplitude plus considérable, et dans la flexion de la jambe qui est beaucoup plus accentuée. Aussi y a-t-il une grande analogie au point de vue de l'action musculaire, et par suite des formes extérieures du membre oscillant, dans les deux cas.

Au début de l'oscillation, en même temps que les fléchisseurs de la jambe se contractent, on voit les fléchisseurs de la cuisse sur le bassin entrer également en contraction : droit antérieur, couturier, tenseur du fascia lata. Puis la jambe s'étend sous l'influence de la contraction du quadriceps, mais l'extension n'est jamais complète. Elle se trouve limitée par la distension des muscles de la partie postérieure de la cuisse, fléchisseurs de la jambe, que la flexion assez accusée de la cuisse à ce moment place dans un état de distension forcée.

Nous avons vu que, dans la marche, les grands fessiers jouent un rôle assez restreint. Il n'en est pas de même dans la course. Pendant toute la période de suspension, le grand fessier du membre qui est en arrière dessine les formes d'une contraction énergique, pendant que la fesse du côté opposé est distendue et aplatie.

Je n'insiste pas sur l'action musculaire qui préside au balancement des membres supérieurs. Elle est située, suivant le sens du mouvement, en avant ou en arrière de l'épaule.

E. — De quelques variétés de la marche et de la course.

Nous n'avons pas la prétention d'étudier ici toutes les variétés de la marche et de la course, car elles sont fort nombreuses. Il nous suffira d'indiquer les principales, nous contentant d'insister sur une variété dont il a été beaucoup parlé dans ces derniers temps, « la marche et la course dites en flexion ».

Il importe de faire remarquer tout d'abord que toutes les variétés de la marche ou de la course se rattachent au type précédemment décrit, et l'on pourrait les classer, en prenant la marche type comme schéma, suivant qu'elles en exagèrent, en atténuent, en suppriment même certains éléments constitutifs.

Il faut compter d'abord avec les variétés individuelles. Nous savons combien la démarche de chacun de nous diffère, au point de devenir un signe caractéristique de notre physionomie. Bien mieux, le bruit de notre pas seul suffit à nous faire reconnaître. Comme l'attitude et le maintien, la démarche a son expression physiognomonique, dont la raison se trouve dans notre constitution physique et morale. Les conditions toutes mécaniques de la conformation du squelette et de la disposition des masses musculaires qui le font mouvoir amèneront nécessairement des modifications variées dans les mouvements si complexes dont se compose la marche ; de même le moral s'y reflétera, donnant à chacun de ces mouvements une accentuation particulière, et c'est de toutes ces modifications minimes en fait, mais dont le groupement forme un

ensemble très caractéristique, que se compose la démarche de chacun de nous.

On comprend également que la profession imprime un caractère tout spécial à la démarche, surtout si cette profession oblige l'individu à marcher dans des conditions particulières, soit avec une charge, soit sur un terrain inégal et broussailleux. C'est ainsi que les facteurs, les paysans, les manouvriers, les coltineurs, les soldats, les cavaliers, ont une marche spéciale. Les vêtements et la forme des chaussures influent également sur la marche : on ne marche pas de même façon avec une robe, une soutane, ou avec une culotte, avec des souliers, longs ou courts, avec ou sans talons, nu-pieds ou chaussé des socques de certains pays, avec des sabots ou des escarpins, etc...

La nature du terrain, uni ou inégal, montant ou descendant, en pente uniforme ou à marches d'escalier, influe également sur la marche.

La présence d'obstacles à vaincre, tels qu'il s'en rencontre dans la marche contre le vent, en tirant ou en poussant, modifie aussi le type de la marche décrit plus haut. Enfin, les passions qui agitent l'âme du marcheur ont une influence plus ou moins considérable.

Nous nous arrêterons sur quelques-unes des variétés que nous venons de citer. Mais auparavant nous dirons quelques mots d'une démarche qui, pour ne point compter parmi les modes de locomotion, n'en est pas moins intéressante au point de vue expérimental; nous voulons parler de la marche à reculons.

I. — MARCHE A RECULONS

Nous avons relevé là, par contraste, la confirmation des observations faites sur la marche en avant. Dans la marche à reculons (fig. 179), au moment où le pied se porte en arrière, le torse se porte en avant pour faire équilibre au membre ainsi déplacé. On constate en effet, sur la série des images chronophotographiques d'un homme qui marche à reculons, que le torse est en général plus penché en avant que dans la marche ordinaire.

Les oscillations du torse, dans le sens antéro-postérieur, sont beaucoup plus marquées. Elles se produisent très nettement de la façon suivante : dans le pas antérieur, le corps incline en avant; dans le pas postérieur, il incline en arrière. Elles sont en somme de même sens que dans la marche ordinaire, mais plus accentuées. J'ajouterai que, de prime abord, il est peut-être difficile, en présence de la série chronophotographique de la marche à reculons, de reconnaître le sens de la marche; mais, en y regardant de près et surtout en la comparant avec les séries de la marche en avant, il est aisé de relever des différences qui, en outre de celles déjà signalées à propos de l'inclinaison du torse, sont très nettes.

Le pied qui se porte en arrière arrive au contact avec le sol par les orteils (fig. 179) et ce n'est que lorsqu'il est tout entier appuyé sur le sol que les orteils de l'autre pied commencent à se détacher. Puis, ce pied quitte le sol tout d'une pièce, à la manière de ce qui se passe dans la marche sur place, et non en roulant pour ainsi dire de la pointe vers le talon en sens inverse de ce qui a lieu dans la marche en avant.

Il en résulte que la phase de double appui est plus longue que dans la marche ordinaire, et qu'on n'observe jamais, comme dans cette dernière, le moment du double appui pendant lequel le corps se trouve soutenu par le talon d'un côté et les orteils de l'autre.

On peut remarquer encore qu'au moment de la verticale, l'extension du membre portant est bien plus complète dans la marche à reculons que dans la marche en avant.

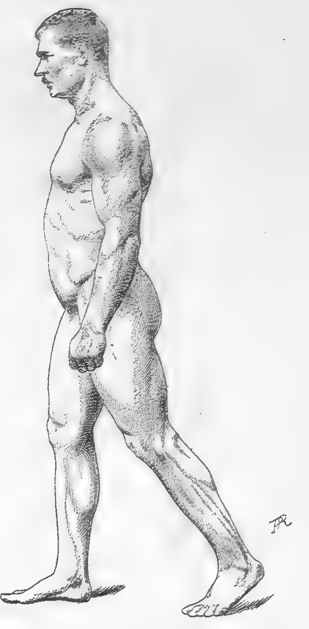


Fig. 179. — Marche à reculons (d'après une phot. inst. de M. Londe).

En outre de ces différences dans la position des membres inférieurs, on constate dans leur morphologie des oppositions dignes d'être relevées et dues à des différences de l'action musculaire.

La plus saillante de ces oppositions peut se constater sur la cuisse oscillante vers le milieu du pas antérieur. Nous savons qu'à ce moment, dans la marche ordinaire, il se produit une saillie énorme au-devant de la cuisse, due à la contraction du quadriceps, suivie de relâchement brusque et dont l'effet est de projeter la jambe en avant. Ici, rien de semblable : en effet, la jambe au lieu d'être étendue se fléchit et se porte en arrière. Aussi la face antérieure de la cuisse est-elle aussi plate ici qu'elle est bombée dans l'autre cas.

Je n'insiste pas sur les autres différences morphologiques.

Je terminerai par une remarque assez curieuse. C'est qu'il résulte des deux circonstances énumérées plus haut : prolongation de la période du double appui d'une part, accentuation de l'inclinaison du torse en avant d'autre part, que plusieurs des attitudes de la marche à reculons ressemblent peut-être plus à l'attitude généralement adoptée par les artistes pour figurer la marche que les attitudes correspondantes de la marche en avant.

II. — MARCHE AVEC UN FARDEAU SUR L'ÉPAULE

Il n'y a pas de différences capitales dans la marche d'un homme, qu'il soit chargé d'un poids assez lourd sur l'épaule ou qu'il n'ait aucune charge.

Cependant, on peut relever les détails suivants :

Le pas est en général plus court.

La période de double appui est plus prolongée. Il s'ensuit que les deux pieds sont appliqués ensemble sur le sol dans une plus grande partie de leur étendue ; c'est ainsi que, tandis que, dans la marche ordinaire, les orteils de la jambe qui devient portante, ou antérieure, ne s'appliquent sur le sol que presqu'au moment où les orteils de la jambe postérieure quittent le sol, ici le

pied de la jambe antérieure est bien appliqué sur le sol, alors que le pied postérieur ne fait que commencer à détacher le talon (fig. 180).

Quant aux mouvements des membres inférieurs, ils sont à peu près les mêmes que dans la marche ordinaire. Il en est de même des contractions musculaires qui ne diffèrent que par une plus grande accentuation sur le membre portant.

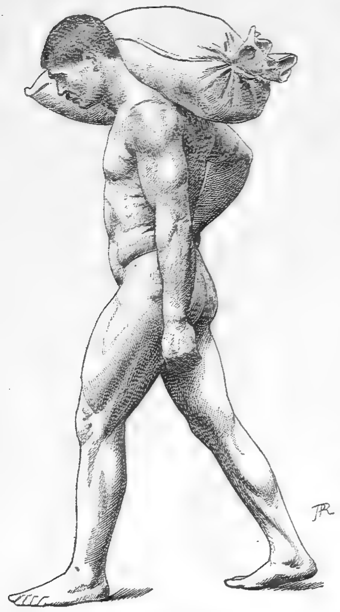


Fig. 180. — Marche avec un fardeau sur l'épaule. — Moment du double appui (d'après une phot. inst. de M. Londe).

Si la charge était portée sur les deux épaules, en même temps qu'elle prend un point d'appui sur la tête, comme chez les coltineurs, les charbonniers, les modifications apportées à la marche, à part une assez forte inclinaison de la tête et du haut du corps en avant, ne semblent pas différer sensiblement de celles que nous venons de signaler.

Il n'en est pas de même si la charge est exclusivement portée sur la tête. La nécessité où se trouve alors le marcheur de maintenir la rectitude du cou et d'éviter les oscillations de la tête dans le sens vertical et dans le sens transversal, l'oblige à un certain nombre de mouvements de compensation qui ont lieu au torse et aux membres inférieurs.

Les oscillations transversales de la tête sont compensées par des oscillations de même sens et très accentuées qui se passent dans le bassin. Le fait est saisissant et facile à observer à l'œil nu.

Quant aux oscillations dans le sens de la hauteur, elles peuvent être presque complètement supprimées par l'attitude spéciale que prennent les membres inférieurs dans la marche dite « en flexion » et dont nous parlerons plus loin. Nous sommes cependant loin d'affirmer que la chose ait véritablement lieu dans la nature, car nous n'en avons la preuve ni par l'examen direct, ni par l'examen à l'aide de la chronophotographie, et nous verrons plus loin que si la marche en flexion diminue les oscillations verticales, elle entraîne nécessairement une dépense musculaire plus considérable.

III. — MARCHE EN POUSSANT OU EN TIRANT

Si l'homme marche en poussant devant lui un corps pesant ou en le tirant derrière lui, les mouvements qu'il exécute sont bien différents de ceux de la marche ordinaire (fig. 182).

Il ne s'agit plus seulement d'imprimer au corps tout seul un mouvement de translation, mais le corps doit entraîner avec lui une masse plus ou moins considérable ou surmonter une résistance plus ou moins grande. Dans ce but, non seulement l'homme use de toute son énergie musculaire,

mais il cherche à mettre à profit, autant que possible, sa propre masse en en déplaçant le centre de gravité de manière à aider au déplacement du centre de gravité de la masse à entraîner. Ces nouvelles conditions d'équilibre changent complètement l'attitude d'un homme qui tire ou pousse en marchant.

Nous remarquons en effet que le corps est fortement incliné en avant. Il l'est plus ou moins suivant le poids de la masse à déplacer.

La phase de double appui est prolongée. Les deux pieds portent à la fois dans toute leur étendue sur le sol. La jambe oscillante arrive fléchie sur le sol, le genou en avant. Le pied prend contact avec le sol bien rarement par le talon, le plus souvent par la plante, d'autres fois par la pointe.

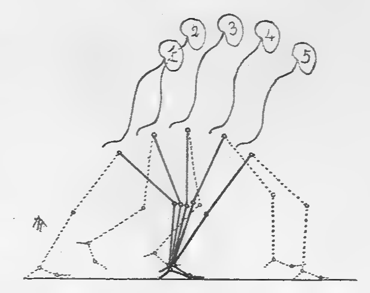


Fig. 181. — Un double pas de la marche en poussant.

Une fois que le pied a bien pris son appui sur le sol, le membre se redresse progressivement et avec effort pour n'arriver en extension que bien après avoir passé le moment de la verticale. Ce membre demeure en extension complète pendant tout le temps du double appui, alors que le talon se soulève, la pointe du pied faisant effort sur le sol pour aider à la propulsion (fig. 182). Puis la pointe elle-même se détache et le membre devenu oscillant s'avance, en état de flexion plus ou moins marquée, pour repren-

Fig. 182. — Marche en poussant. Moment du double appui (d'après une phot. inst. de M. Londe.

Fig. 183. — Marche en poussant une brouette chargée. Moment du double appui (d'après une phot. inst. de M. Londe).

dre à nouveau contact avec le sol, ainsi que nous avons déjà dit, toujours en flexion et sans avoir été en extension, fût-ce un seul instant. En résumé, l'extension ne s'observe que sur le membre portant et lors du pas antérieur seulement.

Quant à l'action musculaire, elle se révèle avec énergie tout particulièrement sur le quadriceps de la jambe portante, pendant tout le cours du pas postérieur. Ce muscle devient alors l'agent de propulsion le plus énergique. Lors du pas antérieur, l'action musculaire se déplace et passe au triceps sural qui soulève le talon et devient à son tour l'agent de propulsion.

Le modelé de la cuisse du membre portant est tout à fait caractéristique.

Un homme qui marche à l'encontre d'un vent violent est comparable à celui qui pousse une charge quelconque. Il y aura donc la plus grande ressemblance, dans les deux cas, entre les caractères de la marche.

IV. — MARCHE EN POUSSANT UNE BROUETTE CHARGÉE

La charge est ici supportée par les bras et elle ne se déplace qu'à la condition d'être poussée en avant. Cette forme de marche tient donc à la fois et de la marche avec fardeau et de la marche en poussant (fig. 183).

C'est ce que démontrent d'ailleurs les photographies instantanées sur lesquelles nous relevons les caractères suivants :

Inclinaison de tout le corps en avant ;

Augmentation de durée de la phase de double appui ;

Le membre oscillant arrive en flexion à l'appui, mais la flexion est moins prononcée que dans la marche en poussant et le pied touche le sol d'abord par le talon, jamais par la pointe.

La jambe portante ne se redresse que bien après avoir passé la verticale. La jambe oscillante, d'abord fléchie comme dans la marche ordinaire, ne se redresse jamais complètement.

L'effort musculaire le plus violent existe au quadriceps de la jambe, lors du pas postérieur, puis au mollet de la même jambe, lors du pas antérieur et pendant la phase du double appui.

V. — MARCHE SUR UN PLAN ASCENDANT

Il y a plus d'une analogie entre la marche sur un plan ascendant et la marche en poussant que nous avons étudiée tout à l'heure.

La phase du double appui est également prolongée, le membre oscillant arrive en flexion à l'appui, le pied prend contact avec le sol par la plante, le membre ne se redresse qu'après le moment de la verticale (fig. 184 et 185).

L'effort musculaire se voit surtout à la cuisse du membre portant, pendant le pas postérieur, et le quadriceps de ce côté est le principal agent du soulèvement du torse ; on constate en même temps que les muscles postérieurs de la cuisse sont contractés. Leur action doit avoir pour but d'étendre

l'articulation de la hanche et de seconder l'action du grand fessier.

Lors du pas antérieur, l'effort musculaire se déplace et se produit sur le même membre au mollet dont le muscle soulevant le talon sert également d'agent de propulsion en haut ou en avant.

J'insiste sur la prolongation de la phase du double appui. Ce qui fait que dans ce cas il existe un moment relativement assez long pendant lequel, un pied portant à pleine plante sur le sol, l'autre pied se soulève sur la pointe progressivement (fig. 185), tandis que, dans la marche sur plan horizontal, un semblable moment est fort court et ne se montre que tout à fait à la fin de la période de double appui (fig. 176).

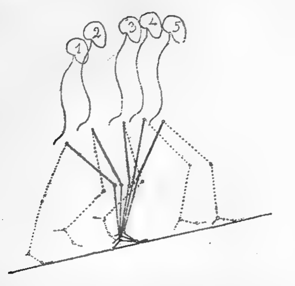


Fig. 184. — Un double pas de la marche sur plan ascendant.

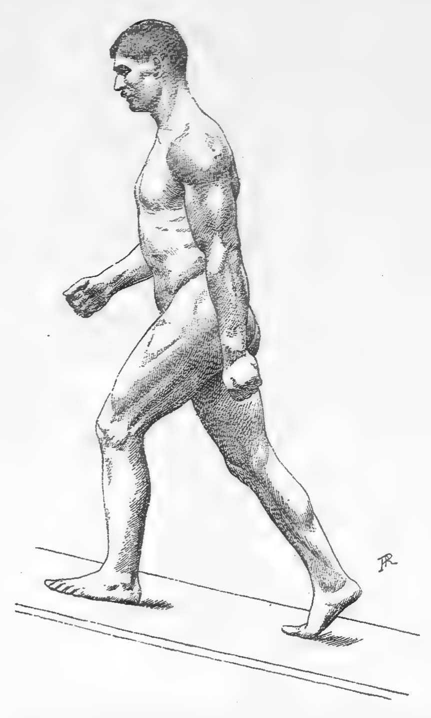


Fig. 185. — Marche sur plan ascendant. Moment du double appui (d'après une phot. inst. de M. Londe).

Le torse ne subit point l'inclinaison en avant que l'on observe dans la marche en poussant, mais il éprouve dans le sens antéro-postérieur des oscillations bien plus marquées que dans la marche sur un plan horizontal et dont le maximum d'amplitude est en avant.

VI. — MARCHE SUR UN PLAN DESCENDANT

Nous ne trouvons guère ici que des contrastes avec les diverses marches que nous venons d'étudier (fig. 186 et 187).

En effet, le membre oscillant arrive à l'appui en extension complète et le pied rencontre le sol par le talon. A peine le pied a-t-il pris contact avec le sol dans toute son étendue que l'autre pied s'en détache par la pointe. En résumé, le mouvement des pieds ne diffère guère de ce qu'il est dans la marche sur un plan horizontal. Ils roulent sur le sol du talon à la pointe.

Le membre portant se fléchit légèrement aussitôt que le contact avec le sol est bien assuré et la contraction du quadriceps se montre alors comme

dans le pas sur plan horizontal, mais avec plus d'énergie (fig. 187). Il est vrai qu'à ce moment le membre portant soutient non seulement le poids du corps, mais ce même poids animé d'une certaine vitesse de chute, conséquence de l'inclinaison du plan de marche. Pendant tout le pas postérieur, le membre portant reste légèrement fléchi ; il ne se redresse, et encore pas complètement, qu'à la fin du pas antérieur. Sa flexion augmente au moment du double appui.

Le membre oscillant est fléchi à des degrés divers tout le temps que dure sa translation dans l'espace. Il s'étend tout à la fin avant de revenir à l'appui.

Il résulte de ce qui précède que, dans la montée comme dans la descente, c'est le quadriceps qui accomplit une bonne part du travail. Travail d'ascension, comparable à celui d'un moteur mécanique, dans la montée; travail de retenue, comparable à celui d'un frein, dans la descente.

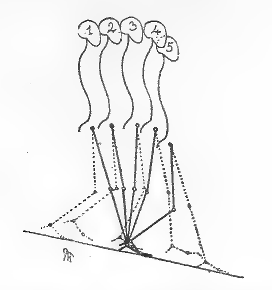


Fig. 186. — Un double pas dans la marche sur plan descendant.



Fig. 187. — Marche sur plan descendant. Moment du double appui (d'après une phot. inst. de M. Londe).

VII. — MONTÉE D'UN ESCALIER

Cette variété de marche ascendante présente naturellement d'assez grandes analogies avec la marche sur plan ascendant. Là aussi l'agent principal de l'ascension est le quadriceps du membre portant qui travaille tout le temps du pas postérieur. Le pied arrive par la plante sur la marche. La phase de double appui est prolongée, et pendant un temps fort appréciable les deux pieds reposent en entier sur deux degrés successifs. Je n'insisterai pas sur les mouvements des deux membres inférieurs; il suffira au lecteur de jeter un coup d'œil sur les figures 188 et 189 pour être complètement édifié.

VIII. — DESCENTE D'UN ESCALIER

Je pense inutile de décrire, en détails, les mouvements des membres

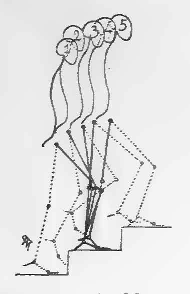


Fig. 188. — Un double pas de la montée d'un escalier.

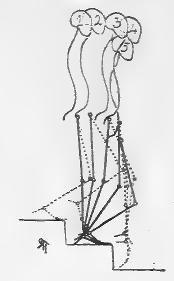


Fig. 189. — Un double pas de la descente d'un escalier.

inférieurs lors de la descente d'un escalier, ce que représentent les dessins des figures 189 et 191 qui valent mieux qu'une longue description. Ils

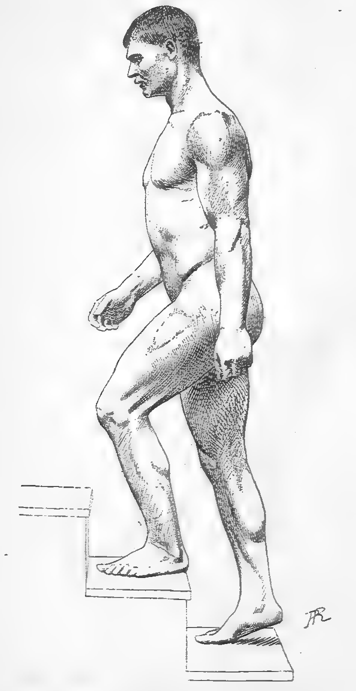


Fig. 190. — Montée d'un escalier. Moment du double appui (d'après une phot. inst. de M. Londe).



Fig. 191. — Descente d'un escalier. Moment du double appui (d'après une phot. inst. de M. Londe).

offrent de grandes analogies avec ce qui se passe dans la descente d'un plan incliné et le lecteur qui voudra comparer les figures 189 et 191 avec les

figures 186 et 187 saisira de suite les analogies et les différences intéressantes à noter.

Telles sont les principales variétés de la marche en tant que simple moyen de transport d'un lieu à un autre; mais il est d'autres variétés d'un tout autre genre et qui consistent en des phénomènes expressifs surajoutés au procédé de locomotion. En un mot, il y a des marches expressives, ou autrement dit des démarches, dont nous allons dire maintenant quelques mots.

IX. — MARCHE EXPRESSIVE

Il est maintes circonstances dans lesquelles un homme qui marche poursuit en même temps un autre but que celui de la simple translation. Il marche



Fig. 192. — Démarche enthousiaste. — Moment du double appui (d'après une phot. inst. de M. Londe).

tout en exécutant un acte quelconque. Il cause, il rit, il se penche de côté ou d'autre pour voir ou écouter, ou bien encore, si ses pas le conduisent à la chasse ou au combat, il se livre aux mouvements plus violents de l'attaque ou de la défense, etc... Et naturellement toutes ces actions surajoutées imprimeront à la démarche un caractère particulier. Au surplus, la marche reflétera toujours les passions du marcheur, et suivant qu'il est pris de lassi-

tude, d'enthousiasme, de tristesse ou de joie, d'humilité ou d'orgueil, etc., etc., elle se revêt de signes distinctifs.

Je n'ai pas ici à entrer dans l'exposé de toutes ces sortes de marches expressives, dont l'étude d'ailleurs ne pourrait être faite avec fruit qu'après celle des passions elles-mêmes qu'elles reflètent et de leurs moyens d'expression.

Je me contenterai d'en citer un ou deux exemples pour montrer combien le type normal de la marche peut en être altéré.

Prenons d'abord un type de démarche guerrière, une démarche d'enthousiasme (fig. 192). C'est un guerrier antique au retour d'une victoire, ou bien, plus simplement, c'est un homme du peuple chantant la *Marseillaise*.

Notre modèle a exécuté devant notre objectif cette dernière démarche et,

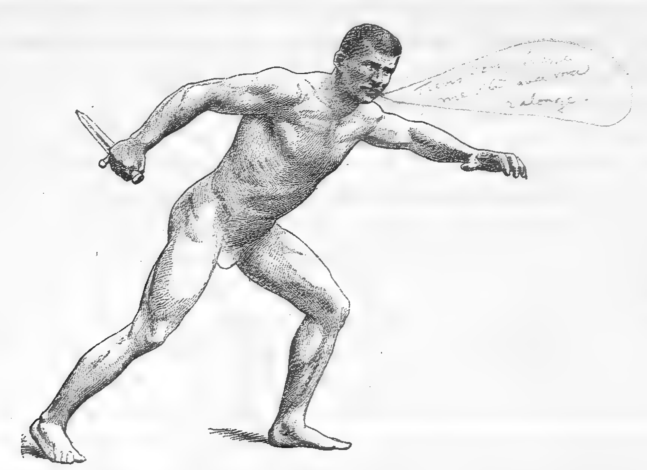


Fig. 193. — Démarche sournoise. — Moment du double appui (d'après une phot. inst. de M. Londe).

sur la série des photographies, nous relevons des caractères fort intéressants. Le corps se penche en avant, les bras s'agitent de diverses manières et la tête revêt une expression de circonstance; mais le plus curieux à considérer, ce sont les mouvements des jambes. La longueur du pas est exagérée. Et la jambe oscillante projetée en avant arrive en flexion sur le sol, au lieu de se trouver à ce moment dans l'extension complète comme dans la marche ordinaire. En résumé, dans le pas postérieur, les deux membres sont en flexion. Dans le pas antérieur, le membre portant seul est en extension.

La figure que nous donnons ici représente la fin du double appui, au moment où va commencer le pas postérieur. Il suffit de le comparer à la figure 176, pour saisir les différences qui existent avec la marche ordinaire.

Prenons maintenant un autre exemple, la démarche sournoise, cauteleuse. C'est un traître qui s'avance le poignard à la main pour surprendre sa victime (fig. 193).

Dans cette démarche, le corps est incliné en avant et les deux membres inférieurs se montrent dans une flexion encore plus prononcée que tout à l'heure. L'extension ne survient que sur la jambe portante seulement et

tout à la fin du pas antérieur. Le membre oscillant arrive fléchi sur le sol.

On trouvera dans ces démarches quelques analogies avec les marches en poussant et en tirant que nous avons étudiées, sauf bien entendu l'inclinaison de tout le corps hors d'aplomb.

X. — MARCHE EN FLEXION

Un caractère commun à un bon nombre de ces démarches (marche contre le vent, en tirant ou en poussant, marche en montant, marche en tapinois, etc..., marche sur un sol inégal, dans les labours, dans les broussailles, est le caractère dit « de flexion ».

Il consiste en ce que le membre oscillant, au lieu d'aborder le sol en extension et par le talon, prend contact avec lui par toute la plante et alors que la flexion du genou est plus ou moins prononcée. Le haut du corps est plus penché en avant, les pas sont plus longs.

Indépendamment de l'effet qui résulte du travail surajouté à la marche, comme résistance à vaincre, ascension à opérer, charges à porter, le travail musculaire est plus considérable dans la marche en flexion que dans la marche ordinaire. La démonstration en est facile à faire.

Nous avons vu, en effet, que, dans la marche ordinaire, la jambe oscillante arrive au contact du sol en extension complète et l'aborde par le talon. Ce mouvement d'extension est déterminé par une contraction brusque du muscle quadriceps, contraction dite balistique et qui se produit explosivement, pour ainsi dire, au moment de la verticale, alors que la flexion du membre place le muscle en état de distension, pour cesser presque aussitôt bien avant que l'extension du membre soit achevée et que le talon touche le sol. Il en résulte que, dans l'intervalle d'un pas, ce muscle de la jambe oscillante est tour à tour dans un état de contraction de courte durée et de complet relâchement. Une semblable alternative de contraction et de relâchement se produit sur le même muscle de la jambe portante; au début du pas, la contraction se manifeste, mais plus soutenue et prolongée, pour cesser complètement à la fin, avant que le pied quitte le sol.

Nous trouvons dans ce mécanisme une des conditions les plus favorables à un travail musculaire longtemps prolongé, et qui consiste dans des alternatives de contraction et de relâchement, d'activité et de repos.

Voyons maintenant ce qui se passe dans le même muscle lors de la marche en flexion.

La contraction balistique n'a plus sa place ici. Pendant toute la durée de l'oscillation, le quadriceps maintient sa contraction, jusqu'au moment où le pied prend contact avec le sol, la jambe en flexion. A ce moment, ce muscle, au lieu d'être comme précédemment dans un état de relâchement complet, voit sa contraction s'accentuer encore pour soutenir le poids du corps qui tendrait à accentuer la flexion du membre qui lui sert alors de soutien. Cette contraction est celle que nous avons appelée contraction frénatrice et dure tout le temps du soutien; de telle sorte qu'au lieu de ces alternatives de travail et de repos, nous voyons ici un muscle en travail continuel pendant toute

la durée du pas, bien que le genre de travail varie (contraction dynamique pendant l'oscillation, contraction frénatrice pendant le soutien).

Certains caractères de tibias humains fossiles, tels que la rétroversion de la tête tibiale et la platycnémie, ont conduit M. Manouvrier (1) à penser que telle devait être la démarche de nos ancêtres de l'époque quaternaire. Chez eux, la marche en flexion était nécessitée par leur genre de vie spéciale et les conditions du milieu. Ils marchaient sur un sol inégal et broussailleux. Ils vivaient des produits de leur pêche et de leur chasse, obligés souvent de fournir de longues courses avec de lourds fardeaux. M. Manouvrier fait remarquer que ceux parmi les hommes actuels qui ont à exécuter de longues marches dans des terrains accidentés ou avec des fardeaux, tels que les soldats chargés du sac, les paysans, les montagnards, les facteurs ruraux, les chasseurs de profession, marchent également en flexion, non pas parce que ce genre de marche, fait-il justement remarquer, occasionne une dépense musculaire moindre, mais parce que, dans les conditions où ils se trouvent, ils ne sauraient marcher autrement.

De nos jours, M. le commandant de Raoul, qui s'est occupé avec beaucoup d'ardeur de la marche du soldat, a préconisé toute une méthode d'entraînement pour augmenter la rapidité du déplacement de l'infanterie. Il est arrivé par expérience à former une allure spéciale qui n'est autre que la « marche en flexion » (2).

Cette méthode consiste à maintenir les jambes fléchies tant qu'elles supportent le poids du corps, à ne les étendre qu'au moment de la propulsion, à ne fléchir la jambe pendant son oscillation que juste assez pour que le pied ne heurte pas les aspérités du sol. Le corps doit être penché en avant et son inclinaison doit augmenter à mesure que le pas s'allonge.

L'instruction des hommes doit se faire progressivement et suivant une règle qui gradue les exercices chaque jour, et indique avec soin la durée, les distances à parcourir, la vitesse et la nature du terrain.

Au bout de trois mois d'entraînement, un conscrit peut faire 20 kilomètres avec ses armes sur une route accidentée en 1 heure 50 minutes. C'est là évidemment un très beau résultat.

MM. Ch. Comte et Félix Régnault (3) ont appliqué les méthodes de M. Marey à l'étude des allures en flexion, et ont cherché à donner une explication scientifique des remarquables résultats obtenus par le commandant de Raoul. Ils ont constaté, par l'étude des séries chronophotographiques, que les allures en flexion s'accompagnaient d'une diminution des oscillations verticales, et d'une atténuation des chocs produits par la pression du pied sur le sol. Or, on sait, disent-ils, que les à-coups et les oscillations verticales sont les deux facteurs de la perte du travail dans la progression.

Ces résultats sont extrêmement intéressants, mais il est un point que les

(1) L. Manouvrier. Étude sur la rétroversion de la tête du tibia et l'attitude humaine à l'époque quaternaire (Extrait des *Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris*, 2e série, t. IV).

(2) Méthode du commandant de Raoul, in *Revue de l'Infanterie*, 15 août 1896.

(3) Ch. Comte et Félix Régnault, Étude comparative entre la méthode de marche et de course dite en flexion et les allures ordinaires (*Archives de physiologie*, n° 2, avril 1896).

auteurs ont négligé, c'est l'étude de la contraction musculaire; or il est facile de démontrer, ainsi que nous l'avons fait plus haut, que le muscle quadriceps travaille plus énergiquement dans la marche en flexion que dans la marche ordinaire. De ce chef, il nous paraît difficile de ne pas admettre avec M. Manouvrier que la marche en flexion est plus fatigante que la marche ordinaire.

On peut faire remarquer, en effet, que si la pression sur le sol est moindre, elle est plus prolongée. De plus, le travail musculaire ne se mesure pas seulement par le travail mécanique produit : élévation d'un poids à une certaine hauteur. La question, ainsi que l'a fait remarquer M. le professeur Marey, est beaucoup plus complexe. Un muscle en contraction statique ou frénatrice ne fournit pas de travail mécanique et n'en produit pas moins une dépense de force en rapport avec le degré et la durée de la contraction. C'est le cas du muscle quadriceps dans la marche en flexion. Il y a donc lieu de se demander si les résultats auxquels arrive le commandant de Raoul ne sont pas dus aux conditions spéciales d'entraînement auxquelles il soumet ses sujets. D'ailleurs, l'expérience n'a pas confirmé les espérances qu'avaient fait naître les premiers résultats obtenus. Je tiens de M. le D[r] Laveran que, d'après les essais les plus récents, la méthode du commandant de Raoul amène la fatigue des hommes et parfois des complications cardiaques, et qu'elle est actuellement abandonnée.

XI. — MARCHE SPORTIVE

La marche sportive, c'est-à-dire exécutée dans le but de parcourir un certain espace dans le moins de temps possible, offre des caractères très différents de la marche ordinaire. La seule règle imposée au concurrent dans les concours de marche et dont l'inobservation entraîne aussitôt la disqualification, est de ne point soulever le pied qui produit la propulsion avant que l'autre touche terre ; en un mot, la période de double appui, qui caractérise à elle seule la marche, doit être rigoureusement observée, et la chose va de soi, car s'il existait un moment de suspension, si court soit-il, tout signe distinctif entre la marche et la course aurait disparu. Mais toute autre modification des mouvements ordinaires de la marche est autorisée. Nous avons connaissance de deux formes de marche sportive entièrement différentes : l'une que nous avons observée par nous-même, l'autre que nous ne connaissons que par ouï-dire. Il nous semble intéressant d'en dire quelques mots.

Le champion des concours de marche du *Racing-Club*, que nous avons vu tout récemment, a adopté une façon de marche qui porte à l'exagération tous les caractères de la marche vulgaire. Les membres inférieurs sont le plus possible en extension complète, la flexion n'intervient que sur la jambe oscillante, et c'est en extension exagérée que celle-ci aborde le sol par le talon. Le torse est droit, nullement penché en avant. Les bras accentuent violemment leur balancement, qui alterne avec le mouvement des membres inférieurs, comme cela a lieu dans la marche ordinaire, au point d'entraîner vivement l'épaule elle-même dans le même sens.

Par contre, les pédestrians anglais ont adopté un genre de marche tout différent qui rappelle l'amble des quadrupèdes et que le Dr Etchandy décrit ainsi : « Dans cette marche « toe-and-heel », le corps doit être droit, la tête bien en arrière, les coudes au côté, les avant-bras horizontalement en avant, les mains fermées. Pour marcher, on lance la jambe en avant, presque en extension ; le pied va se placer devant celui qui est encore posé, le talon touchant le sol le premier et le pied légèrement tourné en dehors. Il ne faut pas écarter démesurément les jambes sous peine de perdre en vitesse. En même temps que la jambe gauche, le bras gauche est poussé en avant et s'allonge comme pour donner un coup de poing, et de même le bras droit doit être projeté en avant avec le pied droit pour être ramené ensuite en flexion au pas suivant.

« Le rôle des bras est très important, à leur avis, et doit être étudié avec grand soin. Il est curieux de noter qu'ils ont trouvé utile de remplacer le balancement asymétrique des bras par un balancement symétrique, et c'est d'autant plus curieux que les Arabes trouvent de même un avantage à contrarier la marche naturelle et en diagonale de leurs chevaux et des ânes, et ils apprennent à ces bêtes, au moyen d'entraves, à transporter en avant à la fois les deux membres du même côté et à marcher l'amble plutôt que leur pas naturel. Or, à cette allure, les animaux vont plus vite qu'au pas sans se fatiguer davantage (1). »

Dans les courses de vitesse que nous avons pu récemment observer et photographier au *Racing-Club*, nous avons relevé les caractères suivants :

La phase de suspension augmente de durée pendant que la phase d'appui devient plus courte. Il en résulte qu'au début de la phase d'appui, au moment où le pied prend contact avec le sol, le membre au levé est beaucoup moins en arrière qu'il ne l'est dans la course ordinaire, et, par suite, se trouve plus rapproché du membre portant. Nous avons vu plus haut que la retombée du pied sur le sol, après la phase de suspension, se fait habituellement par le talon ou par la plante tout entière, rarement par la pointe. Ici, c'est le contraire, et, le plus souvent c'est la pointe du pied qui touche le sol tout d'abord.

XII. — MARCHE PATHOLOGIQUE

L'on comprend, d'après ce qui précède, que la marche est un phénomène extrêmement complexe et qu'elle exige l'intégrité absolue de tout l'appareil locomoteur, os, articulations et muscles, avec accessoirement celle des vaisseaux, artères et veines, qui assurent sa nutrition et, par suite, son bon fonctionnement. Mais il y a plus ; cet appareil n'entre en jeu que sous l'influence des nerfs ; il faut donc également que le système nerveux, depuis le centre le plus élevé jusqu'à la dernière ramification nerveuse, soit également parfaitement sain. Toute lésion qui entravera en un point quelconque ce mécanisme compliqué aura son retentissement sur le résultat final, qui est la

(1) ETCHANDY, *Le Monde médical*, n° 74, p. 11.

locomotion. Nous n'avons pas à faire ici la psycho-physiologie de la marche. Nous sortirions de notre cadre. Il nous suffit de rappeler que les maladies du système nerveux interviennent dans les troubles de la marche pour une part considérable, non moins grande que celle qu'on peut attribuer aux maladies primitives des os, des articulations et des muscles.

La méthode des empreintes a donné, entre les mains de M. Gilles de la Tourette, d'excellents résultats pour l'étude de la marche pathologique.

MM. Quenu et Démeny ont appliqué à l'étude de quelques malades les procédés de la chronophotographie géométrique sur plaque fixe de M. Marey, de manière à étudier les modifications de la trajectoire que décrivent dans la marche pathologique les différents points du corps et des membres. Il y aurait aujourd'hui mieux à faire encore, en combinant la méthode des empreintes avec la chronophotographie à images isolées. Nous avons déjà réuni dans ce but, au laboratoire de la Salpêtrière (service de M. le professeur Raymond), un certain nombre de documents, avec le concours de notre excellent ami, M. A. Londe. Mais c'est là un travail de longue haleine, que le temps seul peut nous permettre de conduire à bonne fin.

F. — Sauts divers.

Le saut n'est point un mode de progression normal pour l'homme qui cependant l'emploie quelquefois lorsqu'il s'agit, par exemple, de franchir un obstacle.

On distingue le saut en largeur, en hauteur ou en profondeur, le saut de plain-pied ou avec élan, le saut à deux pieds ou à un seul pied, etc.

Nous distinguerons, dans l'étude du saut, trois phases :

La phase de préparation ;

La phase de suspension (ascension, descente) ;

La phase de terminaison.

Ces trois phases se retrouvent dans les diverses espèces de saut.

a. ***Saut de pied ferme en largeur*** (fig. 194). — Période de préparation. — Le corps se penche en avant en se fléchissant dans ses divers segments, pendant que les bras se portent en arrière.

Puis les bras se projettent vivement en avant, les différents segments du corps s'étendent les uns sur les autres avec la brusquerie d'un ressort, et le corps quitte le sol.

Période de suspension. — Cette période peut être subdivisée en deux phases : la phase d'ascension et la phase de descente.

Pendant la phase d'ascension, le corps tout entier est oblique, les jambes presque étendues et les bras élevés au-dessus de la tête. Saisi à ce moment précis par la photographie instantanée, l'homme paraît voler. Puis le corps se ramasse, et, au moment où il atteint le niveau maximum de la courbe qu'il décrit, les jambes sont fléchies sous lui et les membres supérieurs, également fléchis, sont ramenés le long du corps.

Enfin la descente commence, pendant laquelle les bras se portent en arrière et les jambes en avant.

Période terminale. — Les jambes fléchies et portées en avant arrivent en

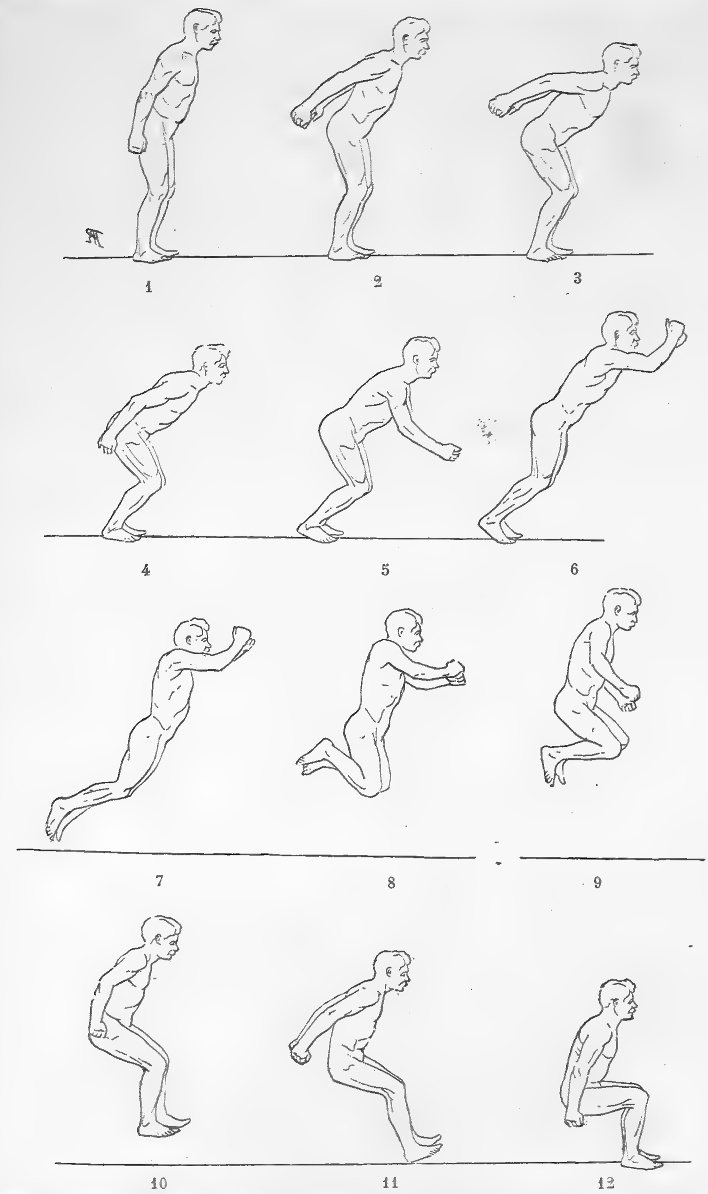


Fig. 194. — Saut de pied ferme en largeur. — 1, 2, 3, 4, 5, 6, période de préparation; 7, 8, 9, période de suspension; 10, 11, fin de la période de suspension; 12, période terminale inachevé (d'après une série de 12 épreuves chronophotographiques de M. A. Londe).

contact avec le sol par le talon. A ce moment, la ligne de gravité du corps passe bien en arrière de la base de sustentation, mais la chute en arrière est

empêchée par la vitesse acquise qui, en vertu de l'inertie, pousse le corps en avant.

Les jambes se fléchissent de plus en plus en même temps que le pied touche le sol par toute la plante. Et cette flexion n'a d'autre but que d'amortir le choc. A ce moment, l'homme est complètement accroupi; puis, ayant repris son équilibre, il se redresse peu à peu.

L'énergie musculaire déployée par le saut revêt, suivant les périodes, deux formes bien différentes.

La phase de préparation a pour effet de tendre les muscles extenseurs des divers segments du membre inférieur, triceps du mollet et quadriceps de la cuisse, c'est-à-dire de les placer dans la situation la plus favorable à une contraction énergique. Puis, cette contraction se produisant brusquement, le corps est lancé dans l'espace.

A la fin du saut, ce sont bien encore les mêmes muscles qui se contractent, mais leur contraction n'a plus pour but de produire un travail mécanique; elle n'a d'autre effet que d'amortir le choc, de résister à l'effort de la pesanteur augmenté par la vitesse acquise. Dans le premier cas, c'est une contraction dynamique, le muscle fait l'office d'un moteur. Dans le second cas, le muscle remplit le rôle d'un frein et c'est cette contraction que nous avons proposé d'appeler frénatrice.

b. ***Saut en largeur avec élan.*** — Ce saut est précédé de quelques pas de course destinés à imprimer à tout le corps une certaine vitesse de translation qui s'ajoute à celle que lui donne la détente musculaire au moment où le pied quitte le sol. Aussi, l'espace franchi de cette façon est-il bien plus considérable que celui que couvre le saut de pied ferme. Le saut une fois effectué, la vitesse dont le corps est encore animé est trop grande pour s'éteindre sur place et l'homme, lancé en avant par l'impulsion acquise, est encore obligé de parcourir quelques mètres à une allure qu'il ralentit progressivement.

Période de préparation. — La période de préparation est représentée ici par la course préalable.

La propulsion qui lance le corps dans l'espace est donnée par une seule jambe. Aussi, la courbe que décrit le corps est-elle généralement moins haute que celle du saut de pied ferme, dans lequel les deux jambes donnent l'impulsion. Mais, si la courbe est moins haute, elle est beaucoup plus longue en raison de la vitesse imprimée au corps par l'élan.

Si le saut s'effectue avec tremplin, cet accessoire, par son élasticité propre, ajoute à la force de propulsion dans le sens de la hauteur et le corps décrit dans l'espace une trajectoire beaucoup plus élevée.

Période de suspension. — Dans la première partie (ascension) les deux membres inférieurs sont désunis et fléchis. Cette flexion augmente en même temps que les bras se portent en arrière. Le corps atteint rapidement le sommet de la courbe qu'il doit décrire; et la dernière phase de la suspension, ou descente, est de beaucoup plus longue que la première.

Pendant sa durée, les bras restent toujours fortement ramenés en arrière, tandis que les jambes, se réunissant, passent en avant du corps en s'étendant

progressivement, de telle manière qu'au moment où les pieds touchent le sol par le talon les membres inférieurs ne sont pas éloignés de l'extension, sans l'atteindre toutefois.

Période terminale. — A ce moment où commence la phase de terminaison, la ligne de gravité du corps passe de beaucoup en arrière de la base de sustentation. Les phénomènes qui suivent ressemblent beaucoup à ce qui se passe dans le saut de pied ferme. Les jambes se fléchissent à nouveau pour amortir le choc, en même temps que, sous l'impulsion acquise, le corps vient en avant. Mais ici, comme je l'ai déjà dit, cette impulsion est trop forte pour s'éteindre sur place, et la phase de terminaison s'achève par quelques pas de course de moins en moins rapides.

c. **Saut en hauteur**. — Ce saut comporte une phase de préparation qui ressemble beaucoup à celle du saut de pied ferme en largeur.

L'effort est calculé de manière à imprimer à tout le corps un mouvement ascensionnel plutôt qu'un mouvement de translation. Les membres inférieurs se fléchissent dans leurs divers segments, puis s'étendent brusquement pour lancer le corps en haut, pendant que les bras, d'abord rejetés en arrière, violemment projetés en haut, entraînent également le corps dans cette direction.

Phase de suspension. — Au début de cette phase, les jambes sont en extension complète et les bras élevés au-dessus de la tête, tout le corps légèrement incliné en avant. Puis, les membres inférieurs se fléchissent rapidement pendant que les bras s'abaissent.

Au moment où il va atteindre le but, le corps tout entier est complètement ramassé sur lui-même, les pieds un peu au-dessus du niveau du plan qu'ils vont aborder tout à l'heure par la plante entière.

Période terminale. — Au moment où les pieds touchent le sommet de l'obstacle, le corps lui-même est encore en arrière, et sa ligne de gravité tombe bien en dehors de la base de sustentation. Mais, comme dans les sauts précédents, l'impulsion acquise ramène le corps dans la verticale. Il n'est point nécessaire d'amortir le choc, puisque la descente a été presque nulle et les membres inférieurs se redressent progressivement.

Le saut en hauteur peut s'exécuter également avec élan. Comme le saut en largeur avec élan, il est alors précédé d'une course préparatoire. L'impulsion est donnée par un seul pied. Le membre inférieur de l'autre côté est fléchi et porté en haut et en avant. Il touche le premier le sommet de l'obstacle, et ce n'est qu'ensuite que l'autre membre inférieur vient le rejoindre.

d. **Saut en profondeur**. — Ce saut diffère des précédents en ce que la force de propulsion est minime et que presque toute la dépense musculaire est employée à retenir le poids du corps et à éteindre la vitesse qui lui a été imprimée par la pesanteur.

La période de préparation consiste toujours dans la flexion des membres inférieurs et le port des bras en arrière. Puis tout le corps se penche en avant. Il n'y a point d'extension brusque des membres inférieurs, puisque le corps n'a pas besoin d'être poussé en haut. Les pieds seuls s'étendent pour détacher le corps du plan sur lequel ils reposent et le lancer dans l'espace.

PÉRIODE DE SUSPENSION. — Un saut en profondeur est toujours aussi un saut en largeur. Le corps, dans sa chute, décrit donc une certaine courbe. Ce qui distingue cette période de suspension, c'est que les membres inférieurs, d'abord fléchis, s'étendent progressivement au point d'être dans un état d'extension presque complète dans tous leurs segments au moment où ils vont toucher le sol.

PÉRIODE TERMINALE. — C'est là que se concentre l'effort musculaire, et cet effort sera tout de modération et de retenue. Il fera l'office du frein qui arrête la machine industrielle au milieu de son mouvement. Tout est parfaitement disposé à cet effet. Comme je viens de le dire, le membre inférieur est en extension presque complète et la pointe du pied un peu abaissée rencontre le sol la première. Survient alors, sous la seule influence du choc, la flexion de tous les segments du membre, pied, jambe et cuisse, et c'est pendant cette flexion que les extenseurs puissants, gastrocnémien, quadriceps et fessiers, se contractent énergiquement, non pour l'empêcher complètement, mais pour la ralentir et, par leur effort, contre-balancer celui de la pesanteur et l'annihiler progressivement. Lorsque ce résultat est obtenu, le corps se redresse sous l'action des mêmes muscles et l'homme reprend son aplomb.

DYNAMIQUE DE LA LOCOMOTION

Il nous reste à étudier le travail effectué dans les actes qui constituent la locomotion humaine. Nous le ferons d'après les recherches de M. Marey, auquel nous empruntons presque textuellement ce dernier chapitre.

M. Marey s'est servi de deux procédés pour mesurer le travail dépensé par l'homme dans les différents actes de la locomotion. Il a mesuré l'intensité de la pression des pieds sur le sol au moyen de la plate-forme dynamographique, ou bien il a mesuré le travail effectué d'après les seules indications fournies par la chronophotographie géométrique. « En effet, dit-il, quand on connaît la masse d'un corps, la position de son centre de gravité et les mouvements de ce point, on en déduit le travail dépensé dans ce mouvement. » Les deux méthodes, d'ailleurs, peuvent se combiner et être employées simultanément.

Emploi de la plate-forme dynamographique (1).

Quand un homme monte sur cette plate-forme, le levier inscripteur s'élève à une hauteur variable et s'y tient immobile si l'homme n'exécute aucun mouvement : cette hauteur exprime le poids de son corps ; mais pour peu que l'homme s'agite sur place, la pression verticale de ses pieds change de valeur, ce que traduit le levier par les inflexions de la courbe tracée. Voici la loi qui préside aux variations de pression :

Tout acte musculaire qui a pour effet d'élever le centre de gravité du corps, augmente la pression des pieds sur le sol. Tout acte qui tend à abaisser le centre de gravité diminue la pression des pieds.

(1) Voy. pour la description de l'instrument : MAREY, *le Mouvement*, p. 145.

Mesure du travail accompli dans un saut.

Un dispositif spécial permet d'enregistrer simultanément la hauteur à laquelle l'homme s'est élevé, en même temps que la pression des pieds sur le sol.

Les courbes de la figure 158 représentent deux sauts d'inégale valeur. Elles montrent que tout s'y passe conformément aux lois de la balistique. Quand les aires d'impulsion sont inégales, leurs surfaces sont proportionnelles à la racine carrée de la hauteur des sauts.

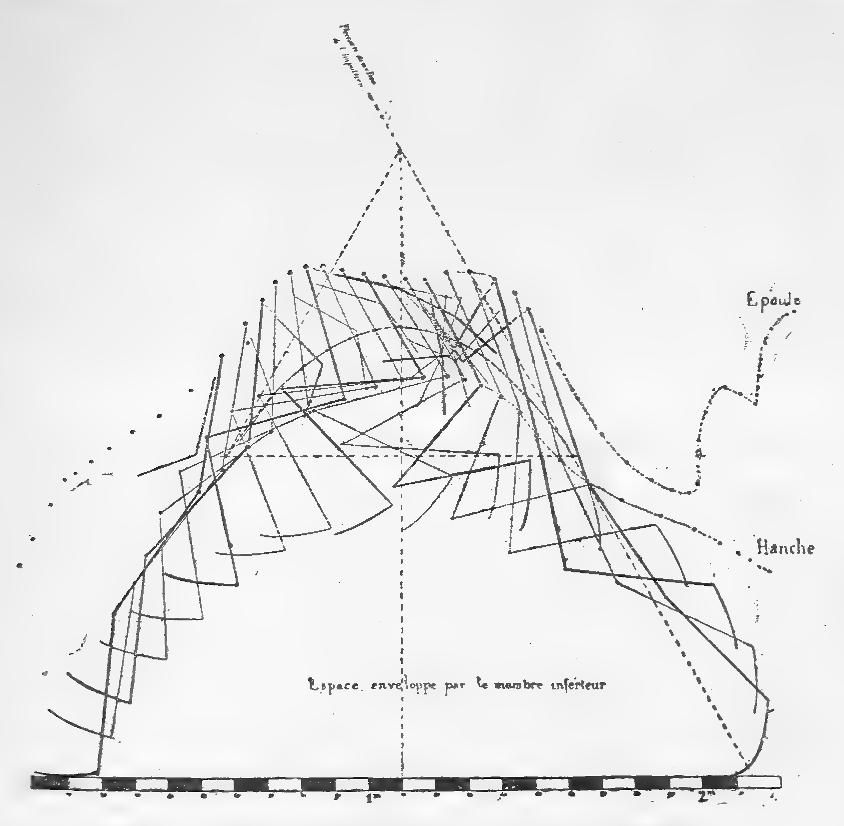


Fig. 195. — Epure géométrique dans un saut en hauteur (Marey).

Deux aires égales entre elles, quelle qu'en soit la forme, correspondent à des sauts de même hauteur.

Si deux hommes de poids différents exécutent des sauts de même hauteur, les aires sont proportionnelles aux poids soulevés.

La comparaison des deux séries de courbes de la figure 158 montre que ce n'est pas l'*intensité absolue* de l'effort qui influe sur la hauteur du saut, mais la *quantité de mouvement*, c'est-à-dire le produit des efforts par leur durée, produit qui correspond à l'aire de la courbe. En effet, dans ces courbes, c'est

au plus petit saut que correspond l'effort le plus intense, mais aussi le plus bref. Un effort intense et bref peut toujours équivaloir à un effort plus faible mais de plus longue durée.

Le travail dépensé dans un saut peut être également mesuré d'après l'épure géométrique des mouvements exécutés dans ce saut. M. Marey en donne un exemple dans son livre *le Mouvement*, page 151. Sur cette figure, que nous reproduisons ici (fig. 195), sont tracées les positions successives des jambes, des bras et de l'épaule. Des lignes ponctuées ont été tracées pour éclairer cette figure : l'une montre la direction de l'impulsion au moment où le corps quitte le sol; l'autre, inversement inclinée, correspond à la direction dernière de la chute; la bissectrice de l'angle formé par ces deux lignes est verticale et représente l'axe de la parabole sur laquelle se meut le centre de gravité. Mais puisque le centre de gravité se déplace dans le corps à chaque changement d'attitude, il a fallu déterminer la position de ce centre pour un certain nombre d'attitudes représentées sur l'épure, afin de construire la parabole décrite et même pour déterminer les lignes de construction dont on vient de parler. Ces données géométriques suffisent, étant donné le poids du corps, pour déterminer le *travail* dans le saut, puisque la construction de la parabole indique la hauteur à laquelle ce poids a été élevé.

Du travail mécanique effectué dans la marche de l'homme.

Rompant avec la tradition des mécaniciens qui s'étaient contentés d'évaluer le travail de l'homme marchant sur un sol incliné et élevant ou abaissant le poids de son corps d'une certaine hauteur, M. Marey a pensé que la progression sur un terrain horizontal, bien que ne donnant lieu à aucun travail apparent n'en était pas moins la cause d'un véritable travail mécanique, et il a cherché à évaluer ce travail, d'après les mouvements imprimés en divers sens à la masse du corps. En effet, le centre de gravité du corps exécute une série d'oscillations verticales, en même temps que la translation de ce point passe par des vitesses variables, s'accélérant puis se ralentissant pendant chaque oscillation. Enfin, une autre dépense de travail réside dans les mouvements imprimés tour à tour à chacune des jambes, mouvements qui ne sont point assimilables aux oscillations du pendule, ainsi que l'ont cru les frères Weber, mais qui exigent une certaine dépense de force musculaire.

Négligeant, comme peu importants, les déplacements du centre de gravité en dehors du plan vertical, M. Marey étudie les trois éléments suivants :

a. Le travail suivant la verticale ;

b. Le travail suivant l'horizontale ;

c. Le travail nécessaire pour faire osciller le membre inférieur pendant sa suspension.

a. ***Travail musculaire dépensé suivant la verticale.*** — On peut admettre que les mouvements de la tête sont sensiblement semblables à ceux du centre de gravité.

Or, la trajectoire des mouvements de la tête est une courbe sinueuse dont les maxima correspondent au moment de la verticale, et les minima au dou-

ble appui. Les droites parallèles ponctuées tangentes aux inflexions supérieures et inférieures de cette courbe mesurent, par leur écartement, la hauteur des oscillations verticales du corps.

On obtient la valeur réelle de ces déplacements en agrandissant la figure 196 jusqu'à ses dimensions réelles. Le travail produit à chaque élévation et à chaque abaissement du corps se mesure par le poids du marcheur, multiplié par la hauteur verticale qui sépare les droites parallèles ponctuées dans la figure agrandie. Pour un marcheur de 75 kilogrammes, et dont l'amplitude des oscillations serait de $0^m,04$, le travail musculaire correspondant aux oscillations verticales serait, d'après M. Marey, de 12 kilogrammètres à chaque pas.

b. ***Travail musculaire dépensé suivant l'horizontale.*** — La vitesse de translation du corps suivant l'horizontale est périodiquement variée,

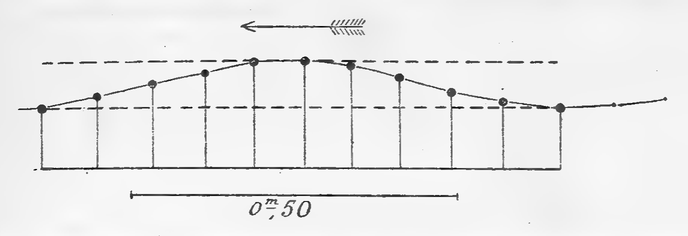


Fig. 196. — Oscillations verticales de la tête d'un homme qui marche (Marey).

d'où résultent des variations périodiques de force vive, mesurant le travail moteur ou résistant dépensé aux différentes phases de l'appui des pieds. Ces variations de vitesse se déduisent de l'écartement des points de la trajectoire, puisqu'ils sont photographiés à des intervalles de temps égaux. La projection horizontale de ces intervalles permet de construire la courbe des vitesses de la translation horizontale, en prenant pour ordonnées des longueurs proportionnelles à l'écartement des points, c'est-à-dire à la vitesse. Des vitesses maxima et minima de la masse du corps, on déduit les deux valeurs correspondantes de la force vive que cette masse a possédée.

Le travail moteur et résistant effectués par les muscles égalent, chacun, la moitié de cette variation de la force vive, de sorte que la somme de ces deux travaux a pour valeur limite supérieure la variation de la force vive tout entière. Elle serait donc dans le cas présent de $2^{kgm}5$.

c. ***Travail musculaire dépensé pour le déplacement de chacun des membres inférieurs pendant sa suspension.*** — Le transport du membre inférieur est le mouvement très complexe de deux pendules articulés bout à bout, éloignés de leur position d'équilibre et livrés à l'action de la pesanteur combinée à celle des muscles, pendant que le point de suspension lui-même se meut d'un mouvement varié sur sa trajectoire curviligne.

La méthode employée pour assurer le travail correspondant à cette oscillation consiste à mesurer le moment d'inertie du membre inférieur par rapport à son axe de rotation, et à mesurer, sur les épures géométriques, la vitesse angulaire maximum qu'il atteint. La valeur ainsi trouvée est très faible, $0^{kgm}3$ à chaque pas.

Mais l'estimation rigoureuse du travail dépensé à une allure quelconque a bien moins d'intérêt que la recherche des variations de ce travail à mesure que l'allure s'accélère.

C'est ainsi que M. Marey a calculé que la dépense de travail serait, à la seconde, de 12 kilogrammètres dans la marche lente, et de 112 kilogrammètres dans la course rapide.

Valeurs relatives du travail dépensé aux diverses allures.

Si l'on compare entre elles les valeurs des différents éléments du travail dépensé dans un pas, on trouve qu'ils ne sont pas influencés de la même manière par la rapidité de l'allure.

MM. Marey et Démeny sont arrivés aux constatations suivantes (1) :

a. ***Variations du travail dépensé dans les oscillations verticales du corps***. — Dans la marche, ce travail augmente rapidement entre 55 et 70 pas à la minute, puis va en décroissant. Dans la course, il est très grand pour les cadences les plus lentes et diminue à mesure que l'allure devient plus rapide.

b. ***Variations du travail dépensé dans les accélérations et les ralentissements de la translation horizontale du corps***. — Cet élément du travail s'accroît assez régulièrement avec la vitesse de l'allure et avec la longueur du pas. Dans la course, il prend une valeur très grande, quoique les variations absolues de la vitesse soient faibles.

c. ***Variations du travail dépensé dans la translation du membre inférieur***. — Le travail dépensé dans cet acte croît d'une manière sensiblement proportionnelle à l'accélération de la cadence.

Pour une même cadence, la course coûte moins de travail que la marche.

La conséquence pratique de ce qui précède est qu'il y a pour chaque allure une cadence de choix, celle où la vitesse croît plus vite que la dépense du travail.

(1) Note à l'Académie des sciences, 9 novembre 1885.

LA LOCOMOTION ANIMALE

Par M. MAREY

LOCOMOTION TERRESTRE

Sommaire. — Locomotion quadrupède. — Formation des allures. — Inscription des allures; transition. — Des pistes ou empreintes. — Représentation du cheval d'après la chronographie et les pistes. — Muybridge et l'application de la photographie instantanée. — Chronophotographie des allures; épreuves, mouvements partiels. — Mécanisme de la locomotion quadrupède; schéma de M. Le Hello. — Des mouvements imprimés à la masse du corps dans la locomotion. — Locomotion des reptiles, lézards, serpents. — Locomotion des insectes et des arachnides. — Locomotion des chenilles et des mollusques.

Locomotion des quadrupèdes. — Au point de vue du mécanisme de la locomotion, on peut considérer un quadrupède comme formé de deux êtres bipèdes marchant ou courant l'un derrière l'autre. Dans tout mode de progression soutenue, ces deux bipèdes font constamment des enjambées de même nombre et de même longueur; l'accord ou le désaccord des mouvements des membres similaires produit toutes les variétés des allures. Ainsi, quand les membres similaires des deux marcheurs se meuvent en même temps, l'allure est celle de l'*amble*. Un désaccord d'une demi-période amenant en coïncidence l'action du pied droit d'un des marcheurs avec celle du pied gauche de l'autre constitue l'allure du *trot*. Lorsque les actions des quatre membres se suivent à un intervalle d'un quart de période, c'est le *pas*, dans lequel les pieds frappent le sol dans l'ordre suivant : antérieur droit, postérieur gauche, antérieur gauche, postérieur droit. Pour passer d'une allure à une autre, l'animal change temporairement la cadence de ses membres postérieurs jusqu'à ce que soit établie l'allure nouvelle qu'il veut prendre.

En raison des services qu'il nous rend par ses diverses allures, c'est le cheval qui a été le mieux étudié dans sa locomotion. Les hommes spéciaux savent reconnaître par la vue ou par l'oreille l'allure d'un cheval avec les nombreuses variétés qu'elle peut offrir. Mais, ici comme partout, la délicatesse de nos sens a ses limites, et, jusqu'à ces dernières années, bien des points restaient litigieux. On discutait, par exemple, sur ces questions : A l'allure du trot, le cheval perd-il un instant tout contact avec le sol? Quel est à chaque instant le nombre des pieds à l'appui dans les différentes formes du galop? Par quel mécanisme se fait la transition d'une allure à une autre?

La méthode graphique a mis fin à ces désaccords en traduisant d'une manière objective indiscutable la succession et la durée des appuis de chacun des pieds aux différentes allures. En répétant sur chacun des bipèdes antérieur et postérieur du cheval la disposition qui nous avait servi pour étudier la marche de l'homme, nous avons obtenu une quadruple notation qui représente, pour chaque allure, la succession et la durée des appuis des quatre membres.

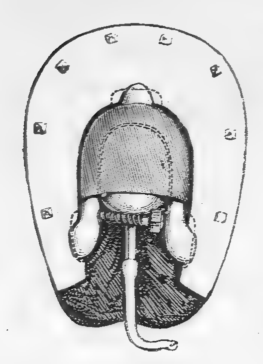


Fig. 197. — Explorateur des appuis du pied du cheval.

Pour remplacer la chaussure exploratrice que nous avions adaptée à l'homme, on munit chaque pied du cheval d'un crampon vissé sous la ferrure (fig. 197) et qui maintient en ce point une boule de caoutchouc bourrée de crin. De cette boule émane un tube qui, longeant les membres du cheval, se rend à l'un des tambours inscripteurs de l'appareil que le cavalier tient en main (fig. 198).

La pression des pieds sur le sol comprime les boules dont ils sont munis, et chasse dans les tambours inscripteurs une certaine quantité d'air qui fait appuyer chaque style sur le cylindre pendant la durée de l'appui du pied

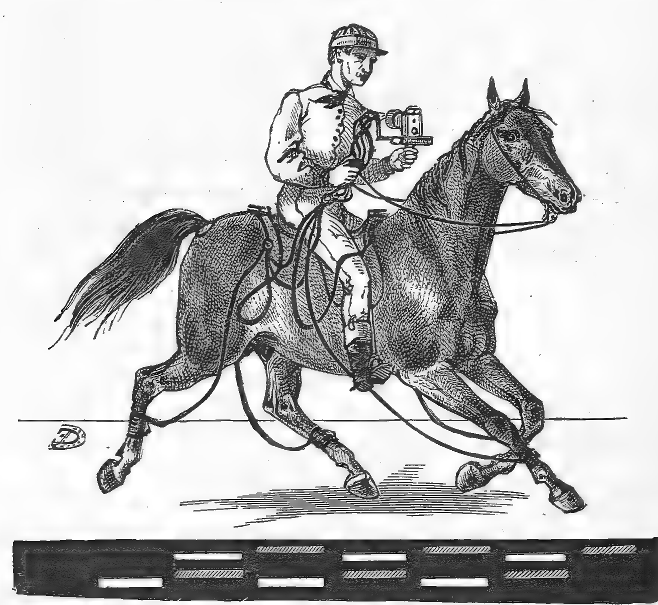


Fig. 198. — Ensemble des appareils pour l'inscription chronographique des appuis et levés des pieds du cheval.

correspondant. Tout se passe donc comme dans les expériences faites sur l'homme. Et comme nous avons comparé la marche d'un quadrupède à celle de deux êtres bipèdes qui se suivent à distance constante, nous avons groupé

les quatre styles en deux séries, l'une qui trace les appuis du bipède d'avant, l'autre qui trace, un peu au-dessous de la première, les appuis du bipède d'arrière. Dans ces deux séries, la notation des pieds droits est formée de traits blancs, celle des pieds gauches est teintée de hachures.

Au-dessous de la figure 198, on a représenté la *notation* correspondant à l'allure représentée, c'est-à-dire au *trot relevé*. Une ligne horizontale qui passerait entre la notation des deux bipèdes laisserait au-dessus d'elle la notation des pieds d'avant, au-dessous celle des pieds d'arrière.

On voit au premier coup d'œil que les appuis des pieds s'associent en diagonale, c'est-à-dire que le pied antérieur droit pose en même temps que le postérieur gauche, et *vice versa*. On voit aussi qu'entre deux battues diagonales successives la notation est interrompue un instant, ce qui signifie que l'animal est un instant suspendu en l'air, aucun de ses pieds ne reposant sur le sol. Tous les genres de trot ne présentent pas au même degré cette suspension ; il en est même dans lesquels l'animal n'est jamais suspendu : on dit alors que le cheval trotte en *rasant le tapis*.

Si l'on veut comparer la cadence des trois allures principales : l'amble, le pas et le trot, on les trouvera rassemblées dans la figure 199. La notation supé-

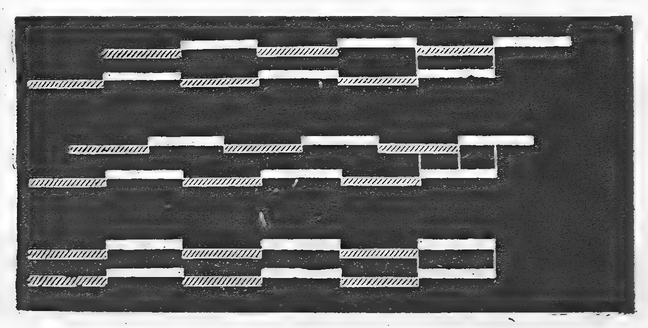


Fig. 199. — Notation chronographique des actions des pieds dans l'*amble*, le *pas* et le *trot*.

rieure correspond à l'*amble* : les pieds similaires d'avant et d'arrière se posent et se lèvent en même temps. La seconde notation est celle du *pas de campagne* (1), dans laquelle chaque battue arrive au milieu de l'appui du membre similaire opposé ; or, comme chaque période d'un pas se compose de deux appuis d'un même bipède, la succession des battues se fait, dans le pas de campagne, avec un intervalle d'un quart de période. Enfin, la troisième notation représente le *trot*, avec ses appuis coïncidant en diagonale. Ce genre de trot sans suspension est le trot rasant le tapis.

Pour montrer comment ces allures dérivent les unes des autres, on les a placées de façon à superposer exactement entre eux les appuis du pied antérieur droit. On voit ainsi que le pas diffère de l'amble en ceci, qu'au lieu de coïncider dans leurs mouvements, les pieds postérieurs se posent avant les anté-

(1) Ce mot désigne l'allure lente ordinaire du cheval, tandis que celui de *pas* s'applique à l'ensemble des actes qui se répètent périodiquement dans toutes les allures.

rieurs correspondants, et cette anticipation est du quart de la période du pas. Dans le trot, l'anticipation des pieds d'arrière est d'une demi-période.

Toutes les allures marchées, et elles sont fort nombreuses, dérivent ainsi de l'amble par une anticipation de plus en plus prononcée du mouvement des membres postérieurs.

Les transitions d'une allure à une autre se font par anticipation ou par retard des pieds d'arrière sur ceux d'avant suivant le cas. Ainsi, comme le montre la figure 199, de l'amble au pas et du pas au trot la différence consiste en une anticipation du membre postérieur; du trot au pas et du pas à l'amble, la différence consiste en un retard des pieds postérieurs.

La méthode graphique permet d'assister à toutes les phases de ces transitions. Ainsi (fig. 200), dans la transition du pas au trot, le pied postérieur droit,

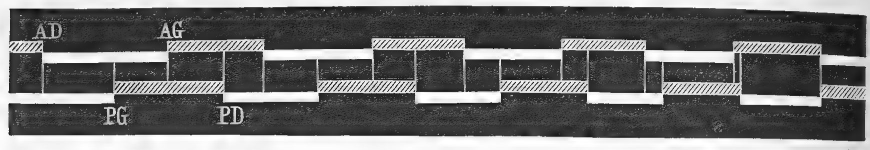


Fig. 200. — Transition du pas au trot.

d'abord en avance d'une demi-période sur le gauche, anticipe graduellement jusqu'à se mettre en coïncidence avec lui. Des lignes verticales marquant l'instant des battues d'avant et d'arrière montrent, par leur rapprochement graduel, comment s'établit la formation des appuis diagonaux.

La figure 201 nous montre au contraire la *transition du trot au pas*. Les lignes, d'abord verticales, qui expriment la coïncidence des appuis diagonaux,

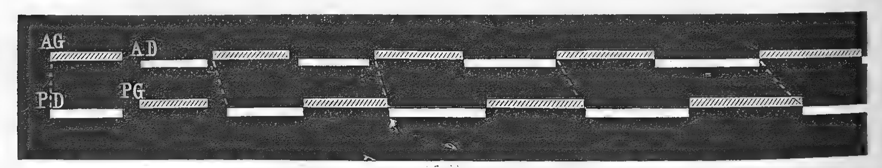


Fig. 201. — Transition du trot au pas.

deviennent graduellement inclinées par retard des membres postérieurs jusqu'à ce que les battues diagonales soient séparées d'un quart de période, ce qui est le caractère du *pas de campagne*.

Le *galop* est une allure sautée dans laquelle chacun des bipèdes, antérieur et postérieur, exécute les actes qui ont été décrits à propos du galop des enfants (1). Dans cette allure, les coïncidences des membres d'avant avec ceux d'arrière sont assez variées. On distingue, d'après la succession des battues, le galop à trois temps et celui à quatre temps.

La notation du galop à trois temps est représentée figure 202, en A. On y voit que, la première battue étant produite par le pied postérieur gauche, la

(1) Marey, *La Machine animale*, p. 141, fig. 36. Paris, Alcan, 1891.

seconde est due à la coïncidence des pieds du bipède diagonal gauche ; la troisième par le pied antérieur droit (ce qui caractérise le galop à droite). La même figure montre, en B, quel est le nombre des pieds qui posent sur le sol

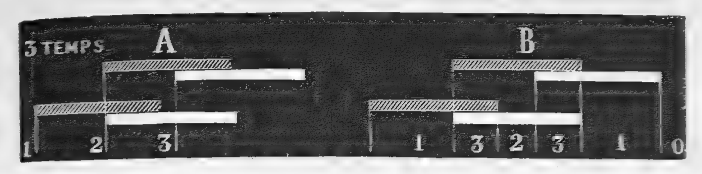


Fig. 202. — A, notation du galop à trois temps. B, nombre des pieds à l'appui à chaque instant.

à chaque instant. L'observation n'avait jamais permis de saisir ce point de la formation des allures.

Entre les groupes de notations A et B, l'animal est suspendu un instant ; on voit qu'il s'enlève par le pied antérieur sur lequel il galope et retombe sur le pied postérieur diagonalement opposé.

Le *galop à quatre temps* diffère du précédent en ce que les battues du bipède diagonal qui, tout à l'heure, constituaient le second temps, se désunissent et donnent deux bruits distincts. La figure 203 montre, en A, la formation de ces

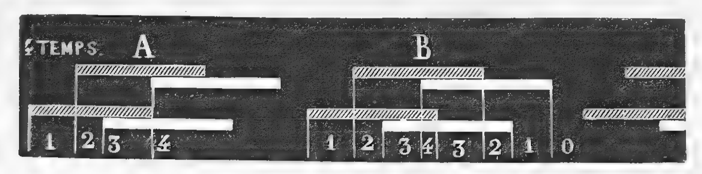


Fig. 203. — Galop à quatre temps.

quatre battues ; elle indique, en B, le nombre de pieds à l'appui à chaque instant ; elle montre aussi la durée relative de la période de suspension.

Enfin, le *galop de course* est encore à quatre temps (fig. 204), mais avec une

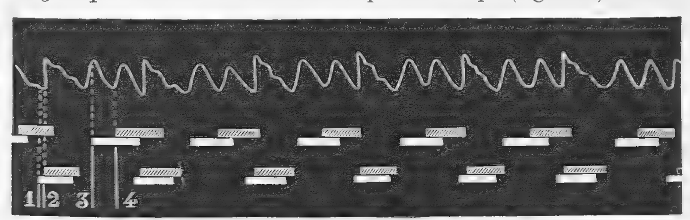


Fig. 204. — Galop de course.

autre association des battues : le bipède diagonal est désuni, tandis que les membres d'avant et surtout ceux d'arrière tendent à confondre leurs battues.

Ces études, si faciles par la chronographie, avaient été longtemps faites d'après la succession des bruits que l'oreille perçoit ; des hommes, même peu exercés, n'ont besoin que d'entendre ces bruits pour savoir si un cheval marche, trotte ou galope ; avec un peu plus d'étude, on arrive à reconnaître si un cheval au pas traîne un fardeau, marche librement, ou est tiré par la bride, ce qui

produit une altération sensible dans la cadence des battues. Mais il serait sans doute impossible de suivre par l'oreille les phases de la transition d'une allure à une autre.

Des pistes ou empreintes. — Ces notions chronologiques seraient encore très insuffisantes pour permettre de prévoir l'attitude d'un cheval à un instant donné de la cadence rythmée de son allure. Il faut savoir encore en quel lieu se fait l'appui de chacun des pieds. Cette notion est donnée avec toute la perfection désirable par les empreintes que les pieds du cheval laissent sur un sol meuble.

Fig. 205. — Pistes ou empreintes du cheval à diverses allures.

Les écuyers ont étudié avec très grand soin ces empreintes, comme les veneurs celles des animaux de chasse. Le tableau (fig. 205) montre l'aspect des empreintes ou *pistes* du cheval aux principales allures.

Comme il arrive souvent que le pied d'arrière se pose exactement sur l'empreinte qu'a laissée le pied antérieur du même côté, on a donné aux fers du cheval en expérience des formes qui puissent être reconnues sur les empreintes.

Dans le tableau ci-contre, les pieds d'avant forment une courbe simple; ceux d'arrière portent à leurs fers deux crochets latéraux qui s'impriment sur le sol; enfin, toutes les fois que le pied postérieur confond son empreinte avec celle du pied d'avant, on est convenu de l'exprimer par un signe participant des caractères du pied d'avant et de celui d'arrière : une moitié de l'empreinte n'a pas de crochet, l'autre en présente un. Dans toutes ces pistes, les empreintes du côté droit sont situées sur une même ligne ponctuée parallèle à l'axe de translation de l'animal; celles des pieds gauches sur une autre ligne parallèle à la première.

Sur ces pistes, on voit les effets de la longueur du pas sur la position des empreintes : dans le pas ordinaire, les pieds d'arrière se posent exactement à la place que viennent de quitter les pieds d'avant; dans le pas allongé, les

pieds d'arrière vont se poser plus loin; plus loin encore dans le pas rompu et surtout dans l'amble. Le même phénomène s'observe dans les pistes du trot plus ou moins allongé. Ces figures ont été empruntées à divers auteurs; si l'on voulait leur donner plus d'exactitude, il faudrait tenir compte de ce fait, qu'aux allures rapides les empreintes des pieds droits ou gauches se rapprochent de plus en plus l'une de l'autre, ce qui rétrécit la base de sustentation de l'animal.

En combinant cette double notion de la succession des battues et de la position de chaque pied à l'appui, on peut déjà se faire une idée de l'attitude d'un cheval à un instant donné d'une de ses allures. C'est même le seul document dont on pouvait autrefois disposer pour la représentation fidèle du cheval. Un excellent écuyer, qui est en même temps un artiste, le colonel Du-

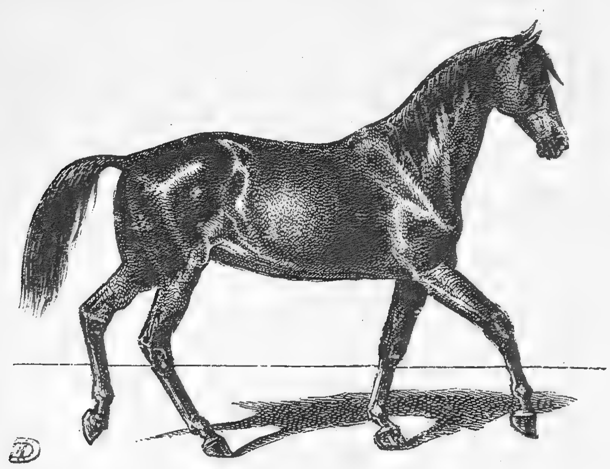


Fig. 206. — Cheval au pas dessiné d'après les pistes et la notation chronographique.

housset, a bien voulu, d'après ces documents, dessiner la figure 206, qui représente un cheval au pas à la fin de son appui diagonal gauche.

On conçoit, cependant, que ces documents qui déterminent seulement la position des membres à l'appui, et laissent ignorer celle des membres au levé, ne soient pas encore suffisants pour caractériser une attitude. La chronographie nous ayant montré qu'un cheval au galop reste un instant sur un seul pied d'avant, l'allure représentée d'après ce renseignement parut étrange à certains hommes versés dans la connaissance du cheval. De ce nombre fut M. Stanford, gouverneur de la petite Californie et possesseur de haras célèbres. M. Stanford, voulant être fixé sur ce point litigieux, s'adressa au célèbre photographe américain Muybridge, pour qu'il tentât de fixer par la photographie instantanée les attitudes du cheval aux différentes phases de ses allures. Je tiens de M. Muybridge ce détail sur l'origine des expériences remarquables d'où dériva plus tard la chronophotographie.

Si l'on compare (fig. 207 et 208) les dessins faits d'après la chronographie et les pistes par M. le colonel Duhousset, avec les images photographiques obte-

nues par M. Muybridge pour les mêmes phases des mêmes attitudes, on voit qu'il existe entre deux images correspondantes, placées sous le même numéro

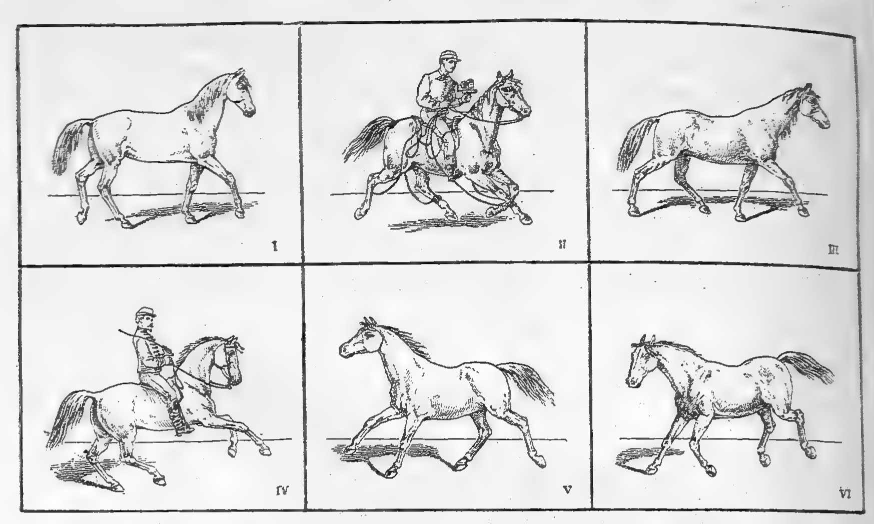


Fig. 207. — Attitudes du cheval dessinées par le colonel Duhousset, d'après la notation chronographique et les empreintes.

dans les deux figures, des différences notables. Ces différences portent sur l'attitude des membres au levé et sur celle du corps lui-même. Si, en parti-

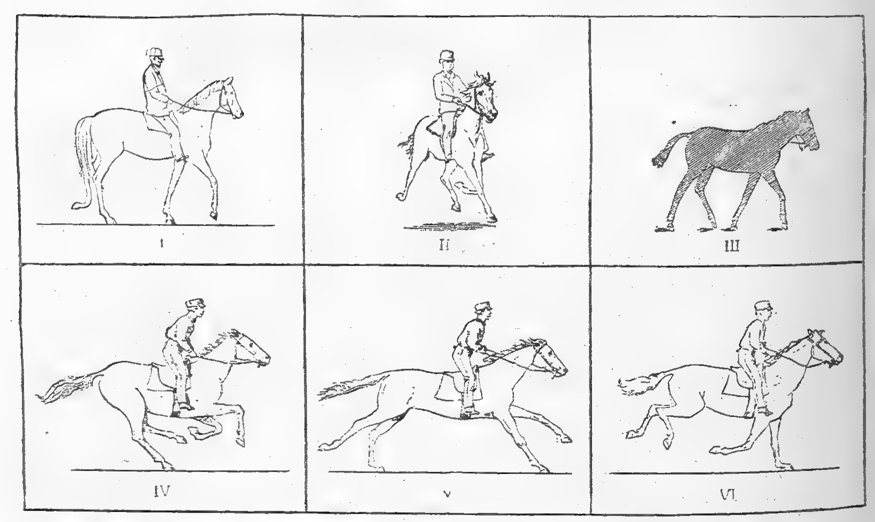


Fig. 208. — Attitudes du cheval d'après les photographies instantanées de Muybridge.

culier, on compare dans les deux tableaux les images portant le n° VI, et représentant le cheval au dernier temps du galop, de part et d'autre, il est vrai, l'animal ne repose que sur un pied d'avant, mais les autres membres,

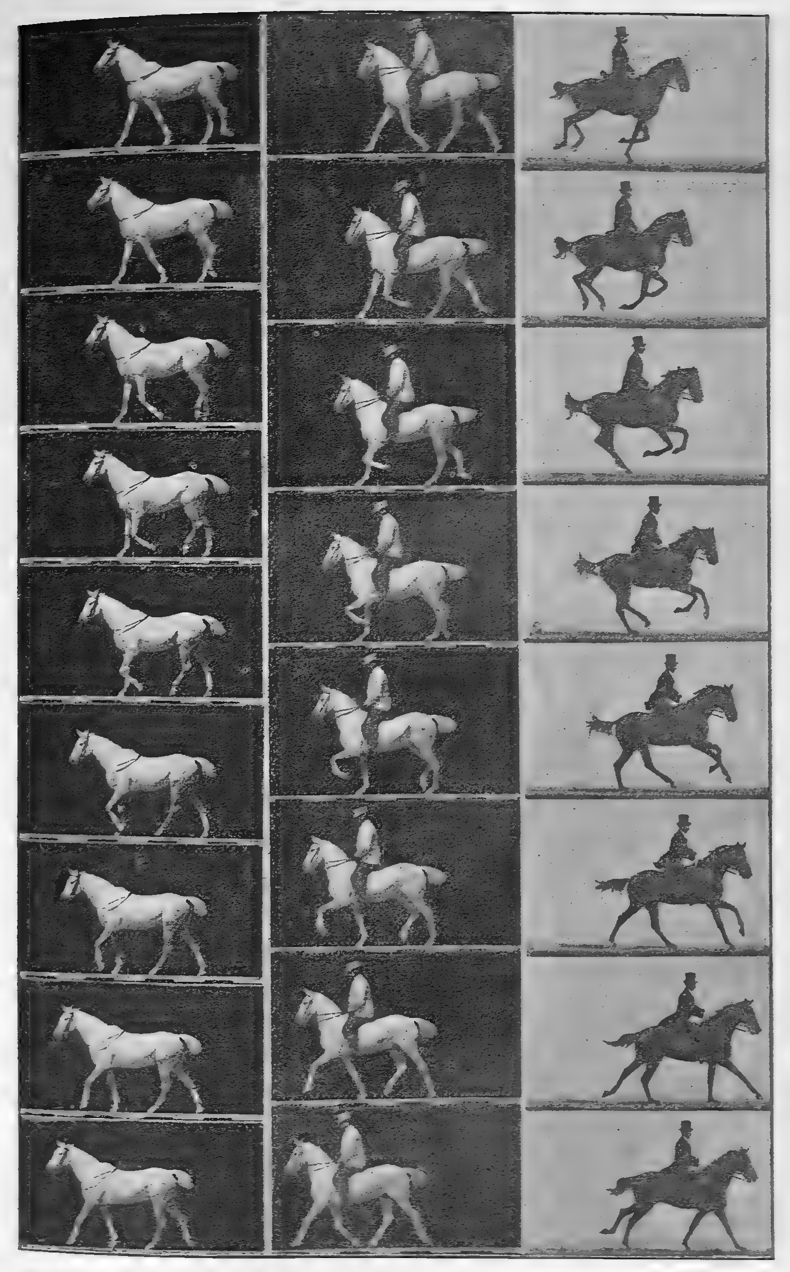


Fig. 209. — Cheval au pas ; un demi-pas.

Fig. 210. — Cheval au trot ; un demi-pas.

Fig. 211. — Cheval au galop ; un pas.

rejetés en arrière dans le dessin, sont, au contraire, rassemblés sous le corps dans l'image photographique.

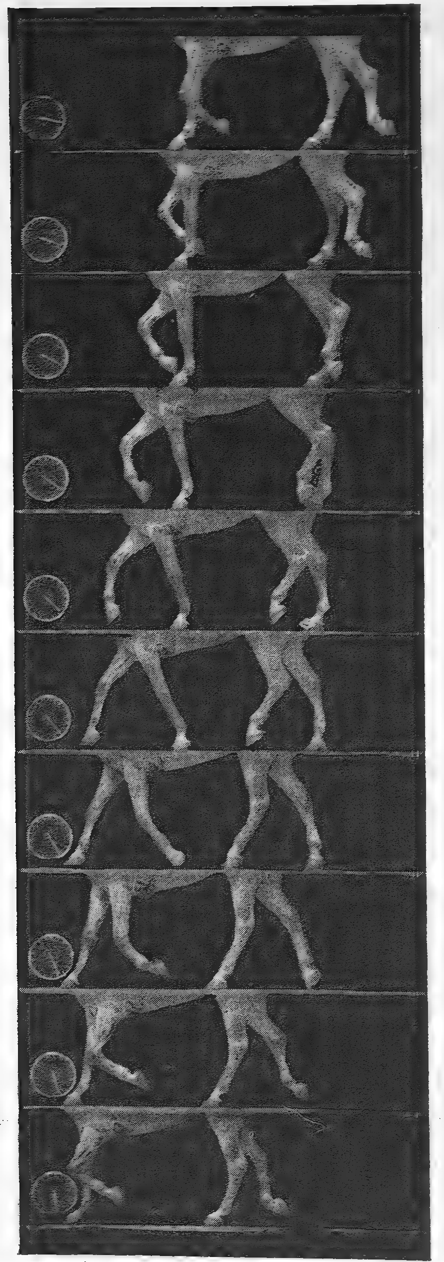


Fig. 212. — Allure du trot, série des attitudes des quatre membres.

Application de la chronophotographie à l'étude des allures du cheval. — Il devenait évident que la photographie seule pouvait donner des renseignements complets sur les attitudes d'un animal en mouvement. M. Muybridge a tiré de cette méthode les admirables renseignements que l'on connaît. J'ai dit ailleurs (1) comment cette méthode, trop laborieuse pour être d'une application courante, m'a paru pouvoir être remplacée par celle que j'ai nommée *chronophotographie.*

Cette méthode m'a donné des séries d'attitudes également espacées dans le temps, et sur lesquelles on peut suivre toutes les phases d'un pas d'allure (fig. 209, 210, 211). Ces séries d'images se lisent de haut en bas ; elles sont plus explicites que le langage pour exprimer les changements d'attitude du cheval. Elles permettent de contrôler l'exactitude des pistes, et même de les construire, en projetant sur un plan horizontal les positions successives des pieds. Mais, comme les indications de la chronophotographie sont intermittentes, elles ne permettent pas de déterminer la durée des appuis et levés avec la même précision que la chronographie et les notations qu'elle fournit.

Si l'on veut analyser plus en détail certains actes particuliers de la locomotion, au lieu de prendre les images du corps tout entier, on se borne à des images partielles, comme celles de la figure 212, où les mouvements des jambes à l'allure du trot se peuvent suivre dans toutes les phases de l'appui et du levé.

(1) Marey, *La Méthode graphique*, avec supplément. Paris, G. Masson, 1884.

A ces méthodes, qui concourent à déterminer les mouvements du cheval, s'ajoute la chronophotographie sur plaque fixe, qui donne directement l'épure des mouvements de chaque partie du corps de l'animal. Mais cette méthode, si facilement applicable à la locomotion bipède, donne des résultats difficiles à utiliser quand on l'applique à la marche des quadrupèdes. En effet, les points et les lignes brillantes appliqués sur les membres antérieurs confondent leurs images avec celles des mêmes signes appliqués aux membres postérieurs, qui viennent à leur tour occuper les mêmes positions sur la plaque; malgré le soin que l'on prend de donner des formes différentes aux repères placés en chaque point du corps, la complication est telle que ces épures sont très difficiles à lire. On évite cette difficulté en construisant les épures par la superposition des images recueillies sur plaque mobile. Voici comment on opère :

Une lanterne à projections est placée sur un meuble élevé; devant son objectif est un miroir à 45°, qui rabat l'image sur une table à dessin. L'image agrandie est décalquée, en totalité ou en partie, sur une feuille de papier, puis l'image suivante de la série est projetée et décalquée sur la même feuille ; on se guide, pour la mettre à sa place, sur des repères fixes que portent toutes les images de la série. On décalque ainsi la deuxième image, puis la troisième, et ainsi de suite (fig. 213). Cette méthode permet de suivre sans confusion la trajectoire d'un point quelconque de l'animal, de tracer l'épure du mouvement de tel ou tel membre, soit d'après le contour de ce membre, soit d'après certains signes brillants rendus adhérents au squelette. En comparant ainsi les phases du mouvement des membres antérieurs et postérieurs du cheval, on en constate la parfaite analogie.

Fig. 213. — Série des attitudes du membre antérieur droit d'un cheval au trot.

D'autres fois, on compare les caractères d'une même allure sur diverses espèces animales, afin de saisir les relations entre la diversité des formes anatomiques et la diversité des mouvements propres à chaque espèce. Ainsi la figure 214 représente une chèvre à l'allure du trot. On est en droit d'attendre que ces comparaisons éclairent beaucoup le mécanisme des allures.

Enfin, la chronophotographie peut renseigner sur le fonctionnement des

organes profonds, os, articulations et muscles. En effet, sur les épures des attitudes successives d'un membre (fig. 215, A), certains reliefs traduisent la position de diverses parties du squelette : le boulet, le calcanéum, la rotule, l'ischion, la crête iliaque, etc. Si donc on possède, à la même échelle que les contours d'un membre, la photographie des pièces osseuses de son squelette, on pourra disposer les os à l'intérieur des parties molles. A cet effet, on a découpé, suivant le contour des divers os, des gabarrits de carton qui ont été disposés dans chacune des silhouettes du membre en mouvement, et d'après ces gabarrits on a trouvé, dans chaque image, la position du squelette (fig. 215, B) (1).

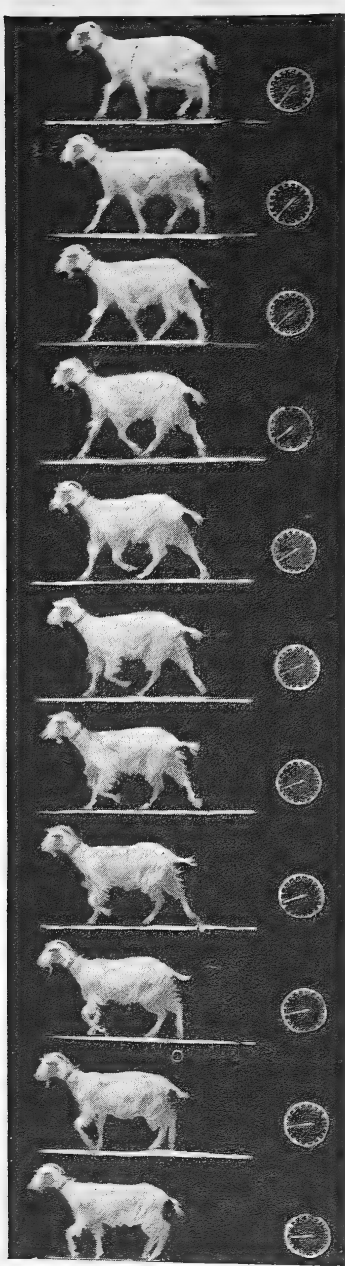


Fig. 214. — Chèvre au trot; attitudes successives des membres pendant un demi-pas de cette allure.

On peut déjà, sur de telles épures, apprécier le jeu des diverses articulations, l'amplitude de leurs mouvements angulaires, la part que prend chacune d'elles à l'allongement ou au raccourcissement du membre. Mais, ce n'est pas tout : les actions musculaires elles-mêmes se déduisent des déplacements osseux.

En effet, si l'on marquait sur chacun des os les lieux d'insertion des divers muscles, on verrait, suivant les attitudes du membre, ces insertions se rapprocher ou s'éloigner les unes des autres, montrant à quels instants chaque muscle s'allonge ou se raccourcit. C'est ce qui a été fait sur la figure 216, où les pièces du squelette, dégagées des contours du membre, ont reçu l'indication schématique des principaux muscles qui les actionnent. Ces indications, disons-nous, sont schématiques; en effet, à la place des insertions complètes des muscles, qui eussent donné des images trop confuses, on a réduit chaque muscle à un faisceau linéaire tendu en ligne droite entre les positions moyennes de ses insertions sur le squelette.

(1) Pour réussir dans cette construction, il faut disposer du squelette de l'animal même qui a été soumis à la chronophotographie ; car, d'un animal à un autre, les proportions du squelette changent assez pour que les pièces osseuses ne trouvent pas à se caser. La figure 215 a été obtenue sur Tigris, un étalon de l'État qui, retiré du service, devait être abattu.

Les masses musculaires ainsi représentées sont les suivantes : A, muscles ischio-tibiaux ; B, muscles rotuliens ; C, muscles gastrocnémiens.

En retranchant de chacun de ces muscles des longueurs constantes représentant les tendons qui ne sont pas contractiles, le reste correspond à la fibre rouge réellement active ; cette partie a été marquée d'un trait noir très fort.

A l'inspection de la figure 216, on voit déjà que, suivant la manière dont les angles du membre s'ouvrent ou se ferment, les muscles changent de lon-

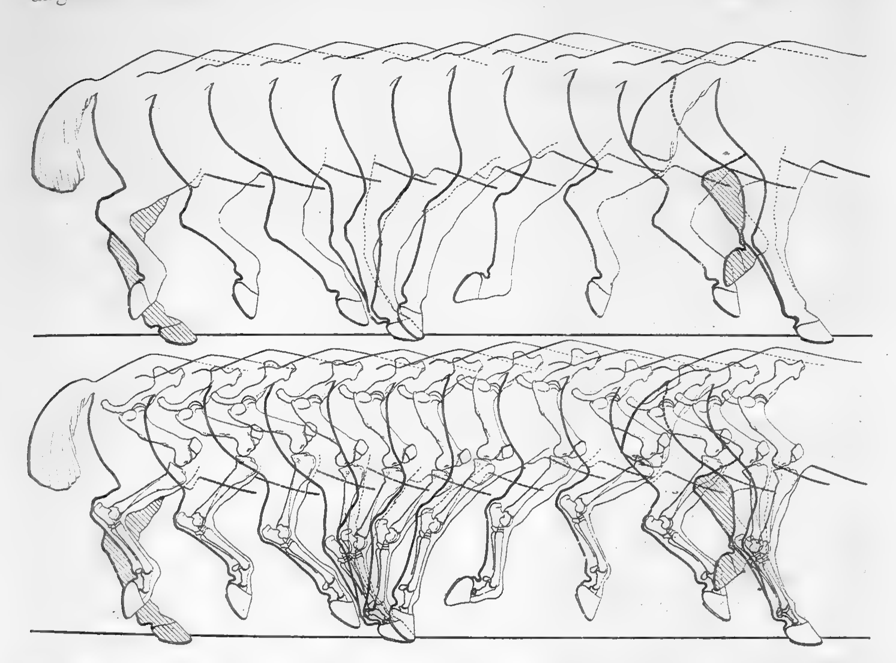


Fig. 215. — Épure des mouvements du membre postérieur droit sur le trotteur Tigris. En A, série des silhouettes du membre pendant la durée d'un pas. En B, attitudes du squelette à chacune des phases du mouvement.

gueur de façons variées, les uns s'allongeant tandis que les autres se raccourcissent et *vice versa*.

Pour rendre plus sensibles les divers changements de longueur de ces muscles, on a construit les courbes de ces changements, dans leurs rapports avec les phases d'appui et de levé du pied. Ces courbes, A, B, C, correspondent chacune au muscle désigné par la même lettre ; on les a construites en portant en ordonnées, au-dessous de la ligne horizontale supérieure, des longueurs proportionnelles à celles du muscle à chacun des instants considérés. Au-dessous de ces courbes est la notation des appuis et levés du pied ; ces derniers sont marqués d'un fort trait noir.

On voit qu'au début de chacun des appuis du pied, les courbes A et B se rapprochent l'une de l'autre, c'est-à-dire que les ischio-tibiaux s'allongent, tandis que les rotuliens se raccourcissent. Cet effet inverse est dû à l'action

prédominante du redressement du genou à cet instant du pas. A la fin de l'appui du pied, les courbes A et B suivent une marche parallèle, toutes deux expriment le raccourcissement musculaire; c'est qu'à ce moment le redressement de la cuisse sur le bassin coïncide avec l'extension du genou; ce qui exige, pour le premier de ces effets, la contraction des muscles ischio-tibiaux, pour le second celle des muscles rotuliens.

On ne peut insister ici sur le détail de ces actions musculaires; notons seu-

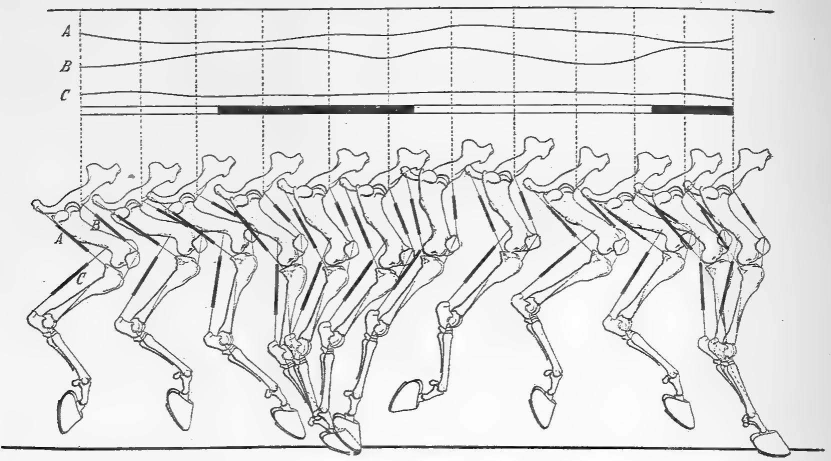


Fig. 216. — Variations de longueur des divers muscles aux phases successives du trot.

lement que la courbe C est très peu flexueuse; cela s'explique par une disposition anatomique spéciale des muscles gastrocnémiens. Ces muscles contiennent à leur intérieur un faisceau fibreux inextensible qui leur permet bien de se raccourcir en certains cas, mais qui limite leur extensibilité. Les choses se passent dans certaines allures comme si une corde rigide était tendue de l'insertion fémorale à l'insertion calcanéenne des gastrocnémiens. Il résulte de cette disposition une solidarité des articulations du genou et du tarse qui, toutes deux, s'ouvrent à la fois.

Cette méthode, appliquée aux différents membres d'un animal, et pour les diverses allures, permet d'apprécier le rôle de chaque muscle dans les divers actes de la locomotion.

Mécanisme de la locomotion quadrupède. — Si avancée que soit aujourd'hui la connaissance des mouvements du cheval, leur mécanisme était resté jusqu'ici fort obscur. A cette question : comment se fait la propulsion de l'animal? on répondait en général que cette propulsion tenait au redressement des courbures des membres postérieurs qui, devenant ainsi plus longs, tendaient à repousser d'un côté le sol, et de l'autre la masse du corps seule capable de se déplacer. En outre, dans la théorie de la marche du cheval, c'est aux membres postérieurs qu'on attribuait presque toute la force propulsive, les membres antérieurs ne faisant que supporter une partie du poids de l'animal.

Certains faits condamnent cette théorie. En ce qui concerne l'action des membres postérieurs, s'ils agissaient comme on dit, par leur accroissement de longueur, c'est-à-dire comme un arc dont on couperait la corde, leur action propulsive ne pourrait se produire que dans les instants où l'appui du pied se ferait en arrière de la verticale passant par l'articulation de la hanche, tandis que, si le pied se trouvait verticalement au-dessous de la hanche, l'allongement du membre n'aurait d'autre effet que de soulever la masse du corps; enfin, si le pied se trouvait en avant de cette même verticale, l'allongement du membre ferait reculer l'animal.

D'autre part, on constate, en certains cas, que les membres antérieurs n'ont pas seulement pour rôle de soutenir le poids de l'avant-main, car on voit certains chevaux paralysés des membres postérieurs se traîner par la seule action des membres d'avant.

M. Le Hello a cherché à établir une théorie plus conforme aux principes de la mécanique et appuyée sur des preuves expérimentales (1). Dans cette théorie, l'auteur attribue un rôle important au poids du corps et à la rigidité de la colonne vertébrale.

Un appareil schématique imitant grossièrement le squelette du cheval

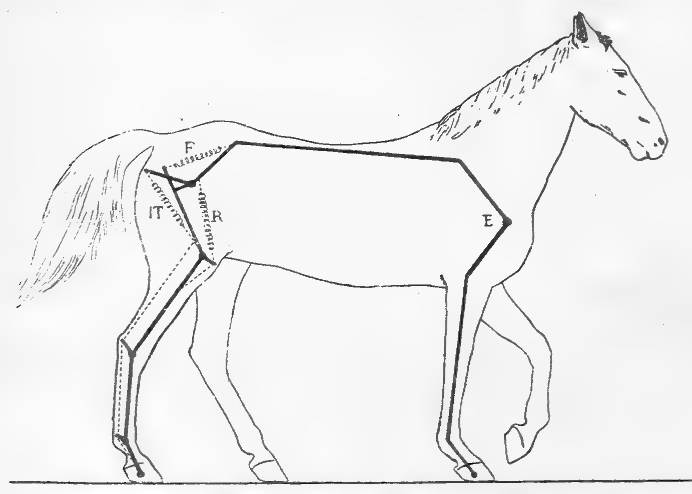


Fig. 217. — Schéma de M. Le Hello montrant la façon dont sont imités les rayons osseux et les muscles du membre postérieur droit.

(fig. 217) est représenté dans la silhouette de l'animal pour faire comprendre le rôle de chacune de ses parties. Une tige rigide, pliée en divers sens, représente l'ensemble des pièces solidaires : bassin, colonne vertébrale et omoplate. En E (épaule) s'articule le membre antérieur, formé d'une seule tige flexueuse. Le membre postérieur est formé, au contraire, de pièces multiples, fémur, os de la jambe, canon, phalanges, toutes articulées entre elles et donnant attache, aux lieux d'insertion moyenne des principaux muscles, à

(1) Le Hello, *Journal de l'Anatomie*, janv.-févr. 1894.

des ressorts destinés à représenter les forces motrices agissant sur le système. Le ressort F, allant du bassin au grand trochanter du fémur, imitera les muscles fessiers ; l'autre, IT, représente les muscles qui vont de l'ischion au fémur et aux os de la jambe ; enfin le ressort R imite l'action de la partie la plus importante du triceps crural. Quant au ligament funiculaire qui correspond aux fléchisseurs superficiels des phalanges du cheval, son action est figurée par une corde dont le trajet, pointillé sur la figure, s'étend du fémur à la deuxième phalange.

Pour montrer l'action des différents groupes musculaires dans la propulsion du corps, on assure la stabilité du système dans un plan vertical et, par une traction en arrière, on le place dans la position 1 (fig. 218). On abandonne

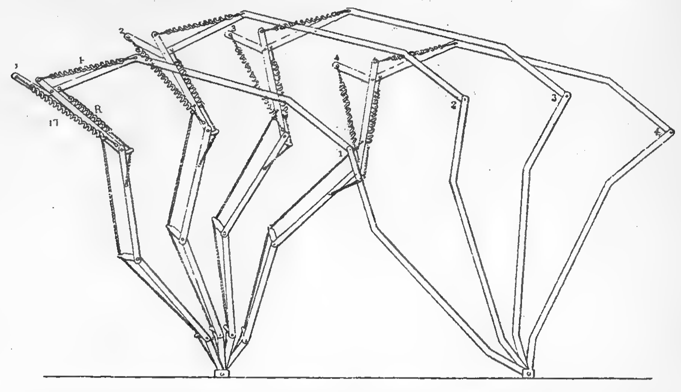


Fig. 218. — Chronophotographie montrant les attitudes successives que prend le schéma de M. Le Hello, par l'effet des ressorts qui imitent l'action musculaire aux membres postérieurs.

alors l'appareil à l'action des ressorts et on le voit prendre successivement les positions 2, 3, 4, que l'on fixe par la photographie.

Pour apprécier le rôle de chacun des groupes musculaires représentés dans le schéma, on supprime successivement l'action de chacun des trois ressorts, ce qui a des effets très différents (1). L'expérience montre ainsi :

1° Que la création des forces locomotrices peut commencer bien avant le milieu de l'appui ;

2° Que le rôle impulsif appartient aux muscles de la région postérieure et surtout aux ischio-tibiaux ;

3° Que le maintien de l'extension des rayons inférieurs des membres dépend presque entièrement des mêmes muscles de la croupe, de la fesse et de la cuisse, dont l'action se transmet par les jumeaux de la jambe et par le fléchisseur superficiel ;

4° Que l'action de la pesanteur sur la masse du corps est nécessaire à la propulsion, et que la rigidité de la colonne vertébrale, par laquelle se transmet le poids du corps au bassin, est indispensable à la production de l'effort impulsif, car si l'on pratique sur le schéma une articulation qui permette à la

(1) *C. R. de l'Académie des Sciences*, 8 juin 1896.

colonne vertébrale de plier, un coude s'y produit sous l'action des ressorts et la propulsion est impossible, comme cela s'observe sur les chevaux atteints d'*effort de rein* (en langage vétérinaire).

Au moyen d'un dispositif analogue, M. Le Hello a cherché à démontrer que les membres antérieurs ont également une action propulsive et que les muscles grands pectoraux sont les agents de cette propulsion.

La figure 219 montre le schéma destiné à démontrer l'action propulsive des

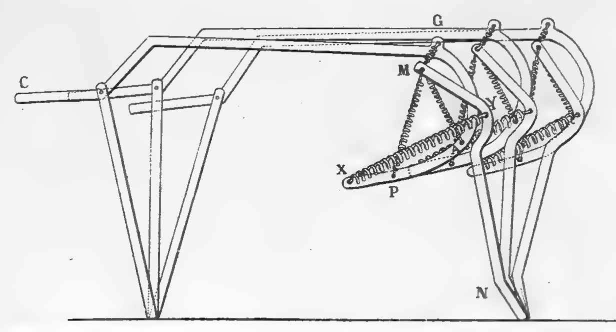


Fig. 219. — Chronophotographie montrant les positions successives que prend le schéma de M. Le Hello sous l'action des muscles grands pectoraux.

membres antérieurs du cheval. La pièce rigide CC correspond au tronc et à la croupe ; MN rappelle les membres antérieurs. Un double lien élastique AM, PM, équivaut au grand dentelé allant des régions costales à la partie supérieure des épaules. Enfin XY est le ressort puissant correspondant au grand pectoral. La figure 219 montre les attitudes successives que prend le corps de l'animal sous l'action des grands pectoraux.

C'est par une série d'expériences de ce genre qu'on pourra sans doute éclairer l'action encore obscure des différents groupes musculaires chez les divers types d'animaux.

Des mouvements imprimés à la masse du corps dans la locomotion. — La méthode ci-dessus décrite, pour obtenir l'épure d'un mouvement,

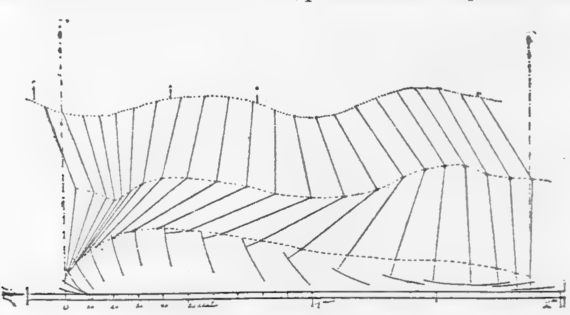


Fig. 220. — Épure des mouvements du membre postérieur de l'homme dans la marche.

s'applique très bien à déterminer les accélérations ou ralentissements de la masse du corps dans le sens horizontal, à chaque instant d'une allure, ce qui donne

indirectement la mesure des forces mises en jeu dans la locomotion, car ces forces sont proportionnelles aux accélérations qu'elles impriment à la masse du corps.

Les déplacements du corps dans le sens vertical ne sont pas moins intéressants à connaître. Si l'on compare à cet égard la locomotion humaine à celle des quadrupèdes, du cheval par exemple, et surtout de l'éléphant, on voit que

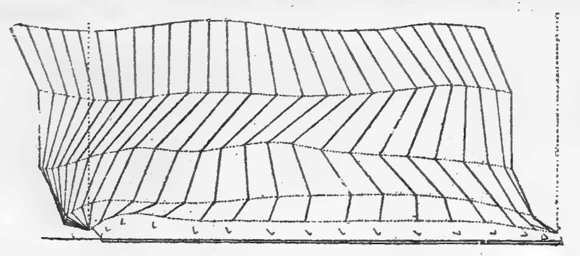


Fig. 221. — Épure des mouvements du membre postérieur du cheval au pas.

l'amplitude des oscillations verticales est relativement plus faible chez ces derniers. Les figures 220, 221, 222 montrent, en effet, que pendant l'appui du pied sur le sol la hanche de l'homme décrit un arc de plus court rayon que celle du cheval et surtout que celle de l'éléphant ; la locomotion de ces animaux se rapprocherait davantage du type décrit sous le nom de *marche en*

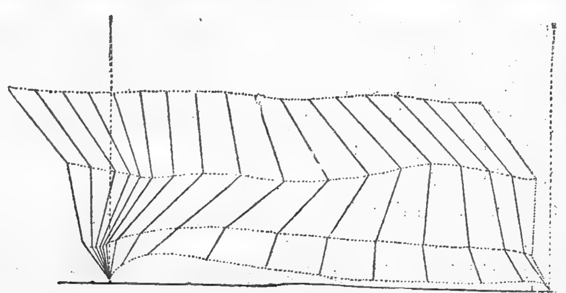


Fig. 222. — Épure des mouvements du membre postérieur de l'éléphant au pas.

flexion. Cet effet est plus prononcé encore chez les petites espèces de quadrupèdes qui, dans la station et dans la marche, ont les articulations fortement fléchies.

Sur des épures de ce genre, on peut suivre également le mécanisme des réactions du cheval sur le cavalier et du cavalier sur le cheval.

LOCOMOTION DES REPTILES

Les *tortues* terrestres paraissent marcher à l'allure du pas ; mais je n'ai pu jusqu'ici les soumettre à la chronophotographie.

Le *lézard gris* (fig. 223) a pour allure le trot désuni. L'œil ne peut suivre ces mouvements trop rapides, mais la chronophotographie les saisit très bien, à condition de prendre un grand nombre d'images, soixante environ par seconde

Le *gecko* (fig. 224) a la même allure, mais, par la torsion plus prononcée du corps, il ajoute à l'amplitude de ses pas, de sorte que ses pieds d'un même côté se rapprochent et s'éloignent beaucoup l'un de l'autre ; le gecko couvre presque l'empreinte de son pied antérieur avec celle du postérieur ; en outre, grâce à la disposition spatulée de ses doigts, il peut courir sur la surface polie d'une glace.

Les *serpents* procèdent par ondulations latérales du corps ; la progression de

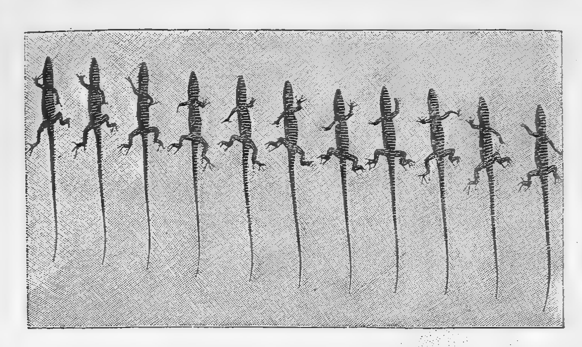


Fig. 223. — Progression du lézard gris étudiée par la chronophotographie.

ces ondes se fait de la tête à la queue. Une couleuvre placée sur une surface lisse progresse difficilement ; on voit toutefois (fig. 225) le cheminement rétrograde de ses ondes et une légère progression de sa tête. Mais sur la surface d'un gazon ou d'un sol broussailleux, l'animal trouve pour ses ondes des points d'appui nombreux et progresse avec rapidité. Supposons qu'un obstacle matériel serve d'appui à la concavité de la première onde comptée à partir de la tête ; comme l'onde se porte en arrière, elle prendra appui

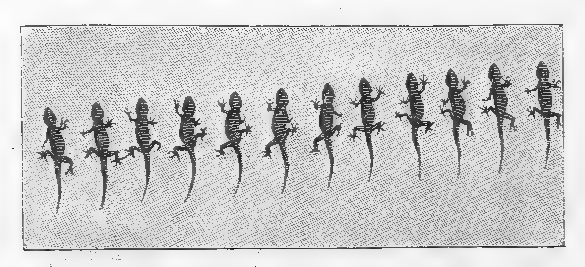


Fig. 224. — Progression du gecko (chronophotographie).

sur cet obstacle, au contact duquel de nouvelles portions du corps de l'animal viendront toujours se présenter, jusqu'à ce que la queue elle-même vienne au contact de l'obstacle.

Pendant ce temps, en avant de l'obstacle, la partie antérieure du serpent s'allongera et formera des ondes nouvelles qui trouveront des appuis nouveaux.

Comme la couleuvre rampait sur une surface lisse, ses ondes glissaient sur le sol et la progression n'était que partielle, comme s'il se fût produit un recul du point d'appui.

En somme, la progression des serpents est basée sur les faits suivants : en chaque point de la longueur de l'animal, un côté du corps est contracté et l'autre relâché ; ces états de contraction et de relâchement se propagent d'avant en arrière ; toute partie actuellement contractée sera relâchée l'instant d'après et *vice versa*. Nous retrouverons ce mouvement ondulatoire à propos de la natation de certains poissons.

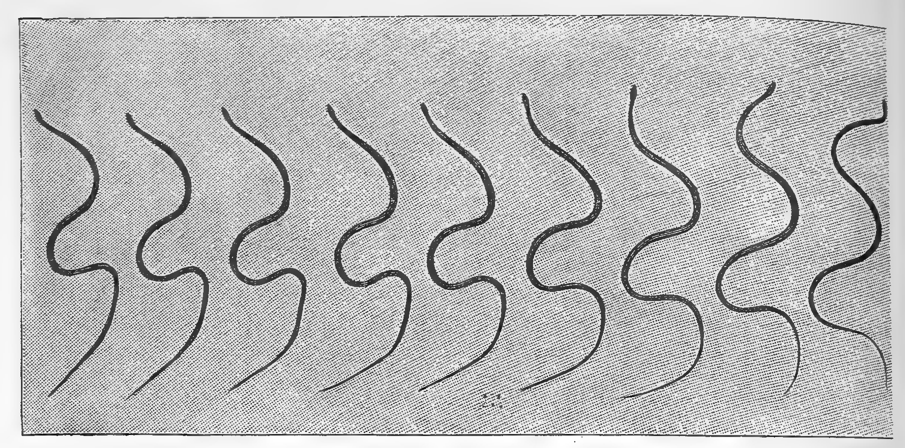


Fig. 225. — Progression du serpent étudiée par la chronophotographie.

Pour énumérer les types divers de la locomotion terrestre des animaux, il faudrait passer en revue celle des insectes, des arachnides, des chenilles, des mollusques. Ce n'est que dans un traité spécial que ces questions pourraient être traitées avec quelque développement ; nous n'en donnerons qu'une idée sommaire.

Les **insectes**, étant munis de six pattes, en meuvent trois tandis que les trois autres sont à l'appui (1). Ces trois pattes sont, par exemple, la médiane du côté gauche et les deux extrêmes du côté droit. L'instant d'après, on verra se lever la médiane du côté droit et les extrêmes du côté gauche, et ainsi de suite. La figure 226 représente la série chronophotographique de ces attitudes chez un coléoptère. Mais cette méthode n'est pas aussi claire que celle à la-

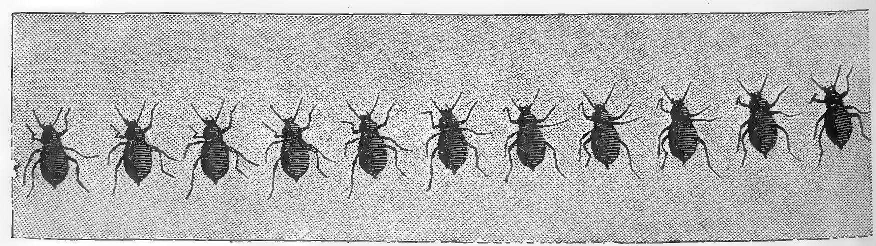


Fig. 226. — Marche d'un coléoptère (chronophotographie).

(1) Carlet, *Zoologie médicale*, p. 426. G. Masson, 1881.

quelle a recouru M. de Moor (1) qui, munissant les pattes d'un insecte d'encres diversement colorées, a réussi à leur faire tracer les pistes de leur marche.

Les ***arachnides***, qui ont huit pattes, en meuvent deux de chaque côté, pendant que les autres sont à l'appui. La figure 227 montre la marche du scor-

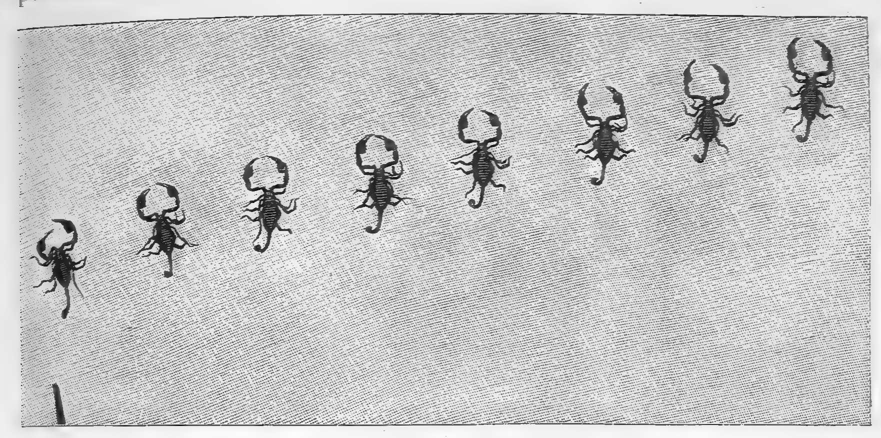


Fig. 227. — Progression du scorpion (chronophotographie).

pion; nous ferons, à cet égard, les mêmes réflexions que pour les insectes. La locomotion est ici tellement rapide, que d'une image à la suivante se passent fréquemment des mouvements inaperçus qui empêchent de suivre la succession des attitudes.

Les ***mollusques*** terrestres ont un mode de progression assez analogue à celui des chenilles. Plaçons une limace sur une lame de verre, puis retournons la vitre; nous observerons par transparence les mouvements d'ondulation du pied. Certaines bandes transversales, d'aspect strié, se fixent contre la glace et servent de point d'appui pour tirer en avant les bandes suivantes qui se fixeront à leur tour comme les pattes de la chenille.

Il sera très intéressant de soumettre à l'analyse, par des méthodes précises, ces mouvements des animaux inférieurs qui montrent l'action des forces locomotrices réduites aux conditions les plus simples.

Les ***chenilles*** procèdent en fixant et en levant tour à tour les paires de pattes symétriques de droite et de gauche. L'animal lève d'abord les pattes antérieures, puis, allongeant l'extrémité antérieure de son corps, va fixer ces pattes en avant de la place qu'elles viennent de quitter. Il élève ensuite les pattes suivantes, puis, par une contraction longitudinale des muscles de son corps, prenant appui sur les pattes de devant fixées, il tire en avant la région qui porte les pattes soulevées. Celles-ci, fixées à leur tour en avant de leur position première, serviront d'appui pour faire avancer la région suivante du corps. Pendant ce temps, la partie antérieure du corps s'allonge de nouveau pour porter en avant les premières pattes, et la série des mêmes actes se répète sans cesse.

(1) De Moor, *Archives de Biologie*. Liége, 1890.

Les espèces dites *arpenteuses* procèdent surtout par fixation alternative des pattes extrêmes antérieures et postérieures, tandis que le reste du corps se plie en arc et se détend tour à tour.

LOCOMOTION AQUATIQUE

SOMMAIRE. — Densité des poissons, rôle de la vessie natatoire. — Équilibre des poissons. — Influence favorable de la forme des poissons sur la résistance au mouvement dans l'eau. — Natation onduleuse de l'anguille, du chien de mer ; rôle de la nageoire caudale, théorie de Borelli. — Nageoire caudale des mammifères aquatiques ; propulseurs imités de la queue des poissons. — Ondulations verticales des nageoires ; hippocampe, raie. — Pattes palmées des oiseaux. — Locomotion des comatules. — Locomotion par éjection de liquide : méduses, poulpe. — Larves d'insectes, mollusques bivalves. — Locomotion des batraciens, des tortues aquatiques.

Certaines espèces animales vivant à la fois sur la terre et dans l'eau transportent dans ce dernier milieu les procédés qui leur servent sur terre.

Un chien qui nage exécute dans l'eau des mouvements qui rappellent l'allure de son pas. Un serpent qu'on jette dans l'eau y progresse par les mêmes mouvements de reptation que sur le sol. On va voir cette même reptation se perfectionner et devenir le mode de locomotion d'espèces purement aquatiques, nous voulons parler des poissons.

La **densité** des poissons est sensiblement celle de l'eau dans laquelle ils vivent, de sorte qu'ils n'ont besoin d'aucun effort pour se soutenir. Toutefois, les espèces dépourvues de vessie natatoire sont un peu plus denses que l'eau; aussi, lorsqu'ils cessent de nager, voit-on ces poissons descendre doucement jusqu'à ce qu'ils viennent reposer sur le sol où les uns rampent, les autres s'installent pour guetter leur proie. Les poissons pourvus d'une vessie natatoire prennent, en général, exactement la densité de l'eau, car on les voit parfois immobiles et semblant dormir sans monter ni descendre.

Mais ce parfait équilibre du poisson exige que le volume des gaz contenus dans sa vessie reste constant. Depuis Borelli, on avait admis que les poissons pouvaient à volonté comprimer ou relâcher leur vessie natatoire et, changeant ainsi de densité, descendre ou monter comme des ludions (1). Cette théorie ne résiste pas aux expériences de M. Moreau (2), qui a montré que les poissons, même ceux qui sont pourvus d'une vessie natatoire, ne s'élèvent ni ne s'abaissent dans l'eau que par l'action de leurs nageoires. Quant au rôle de la vessie natatoire, il est entièrement passif. Cet organe, subissant des changements de volume en raison de la pression extérieure que supporte le poisson, condamne celui-ci à ne jamais quitter brusquement le niveau pour lequel sa densité est adaptée. Si le poisson s'élevait brusquement d'une grande profondeur, sa vessie natatoire, de plus en plus gonflée, le porterait jusqu'à la surface de l'eau, où elle éclaterait ; c'est ce qui s'observe sur les poissons ramenés des grands fonds par les pêcheurs. Que si le poisson s'aventurait au contraire

(1) BORELLI, *De Motu animalium*. Lugduni Batavorum, 1685, prop. CCX.
(2) A. MOREAU, *Mémoires de physiologie*. Paris, G. Masson, 1877.

dans des couches trop profondes, sa densité, croissant en raison de la pression supportée, le précipiterait indéfiniment au fond de la mer.

Toutefois, chez certaines espèces, un canal de sûreté permet à l'air de la vessie natatoire de s'échapper en partie quand l'animal s'élève trop haut. D'autre part, si le poisson est soumis à une pression trop forte, une sécrétion de gaz à l'intérieur de la vessie redistend cet organe et rétablit la densité primitive, mais cet effet est lent à se produire.

En somme, pour la profondeur à laquelle il se tient d'ordinaire, le poisson, possédant exactement la densité du milieu où il est plongé, n'a besoin d'aucun effort pour s'y maintenir et échappe à la pesanteur.

En est-il de même pour la conservation de son équilibre? Autrement dit, le centre de gravité du poisson est-il au-dessous de son centre de poussée de sorte que, sans effort, l'animal se maintienne le ventre en bas, le dos en haut? L'attitude qu'on voit prendre à un poisson qui meurt, la tête à fleur d'eau et le ventre en haut, tend à prouver que le centre de gravité du poisson est plus voisin de sa région dorsale. D'autre part, les expériences de Gouriet (1), dans lesquelles l'ablation des nageoires latérales produisait le retournement du poisson, le ventre en l'air, montrent que, chez certaines espèces du moins, c'est par de légers mouvements de ces nageoires que le poisson garde son attitude.

De la forme des poissons. — Lorsque des corps d'égal volume sont immergés dans un liquide, il faut, pour les y déplacer avec une même vitesse, des forces différentes suivant la forme de ces corps. Une planche que l'on fait mouvoir perpendiculairement à sa surface offre une grande résistance à cause des remous qu'elle forme dans l'eau, tandis qu'un corps de même volume, et qui aurait la forme d'un fuseau, se laisse déplacer avec très peu de résistance. Or, les poissons ont précisément des formes allongées, favorables au mouvement suivant leur grand axe; toutefois, chez la plupart des espèces, c'est la tête qui a le plus grand volume, tandis que les formes d'arrière sont très effilées. Il était intéressant de savoir si une telle conformation est aussi favorable que celle qui présenterait les formes les plus aiguës dans le sens de la progression.

D'expériences faites au moyen de la chronophotographie (2), j'ai pu tirer cette conclusion que, pour des corps pisciformes immergés, il est avantageux que la plus grosse extrémité soit présentée en avant, et que la disposition inverse créerait beaucoup plus de remous, et par conséquent de résistance à la progression du poisson.

Les mouvements de natation du poisson dérivent de la reptation des serpents, ou du moins ce sont les mêmes mouvements qu'exécutent une couleuvre qu'on met dans l'eau ou une anguille qu'on pose sur le sol. Une ondulation générale se propage de la tête à la queue de l'animal, et chacune des ondes qui recule est suivie d'une autre qui s'est formée devant elle. Voici, du reste (fig. 228), l'aspect que présente le phénomène analysé par la chronophotographie. La succession des images se lit de gauche à droite.

(1) Gouriet, Thèse de la Faculté des sciences de Poitiers, 1865.
(2) Marey, *Le Mouvement*, p. 95. Paris, G. Masson, 1894.

Dans le premier instant, la tête du poisson se trouve sur la ligne *oo*, perpendiculaire au sens de la progression; dans les instants successifs, la tête s'avance de plus en plus, suivant la ligne ponctuée *aa*, et comme cette ligne est une droite, elle exprime que, dans des temps égaux, le poisson a progressé de quantités constantes; son mouvement est donc uniforme. La queue a progressé de même uniformément suivant la droite *bb*. Or, pendant cette pro-

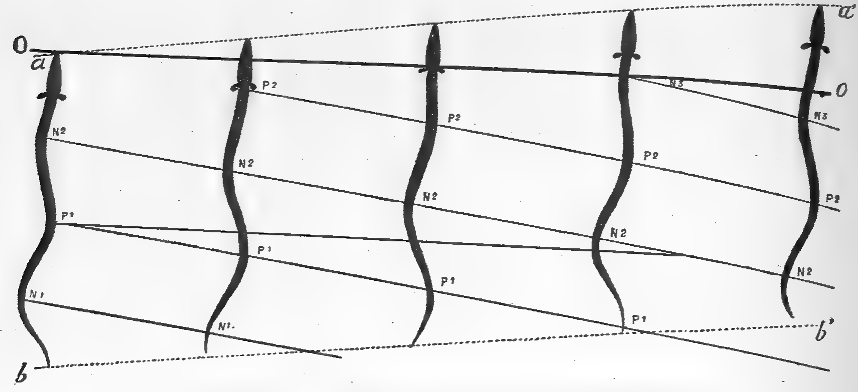


Fig. 228. — Natation de l'anguille (chronophotographie).

gression du poisson, les ondes transversales que forme son corps se sont déplacées aussi, mais d'avant en arrière, comme le montre la direction des lignes p^1p^2 et n^1n^2 qui joignent entre elles les ondes positives et négatives.

En rapportant à une échelle connue le chemin parcouru par la tête de l'anguille pendant qu'on prenait les cinq images séparées par des intervalles de $\frac{1}{10}$ de seconde, on voit que la distance parcourue est de $0^m,075$, ce qui correspond à une progression de $0^m,75$ par seconde. A une vitesse plus grande des ondes rétrogrades correspondrait une progression plus rapide de l'anguille.

Enfin, si l'on mesure l'angle que forment avec la ligne *oo*, d'une part la droite ponctuée qui exprime la vitesse de progression de l'anguille, et d'autre part l'une des lignes parallèles qui expriment la vitesse rétrograde des ondes, on trouve que cette dernière est un peu plus rapide que la progression de l'animal. Il y a donc, ici, comme dans l'action des hélices propulsives, un *recul* qui tient à la mobilité du point d'appui.

Le mécanisme de la propulsion consiste dans la poussée oblique latéralement et en arrière, produite par chacune des ondes rétrogrades. Les composantes latérales de ces poussées, à droite et à gauche, s'équilibrent et se neutralisent; la composante qui chasse l'eau vers l'arrière reste seule et propulse par réaction le corps de l'animal.

Quand l'anguille veut reculer, elle renverse le sens de ses ondulations qui vont alors de la queue vers la tête.

Le même effet s'observe à des degrés divers sur différents poissons : les squales, avec leur corps allongé et flexible, montrent encore des ondes mul-

tiples sur la longueur de leur corps (fig. 229). Mais chez les poissons dont le corps épais et ramassé n'a plus autant de flexibilité dans le sens latéral, l'extrémité de la queue intervient seule pour la natation. Elle est alors armée d'une nageoire plus large, que frappe l'eau alternativement à droite et à gauche. Grâce à sa flexibilité, cette nageoire s'incurve sur la résistance du liquide et

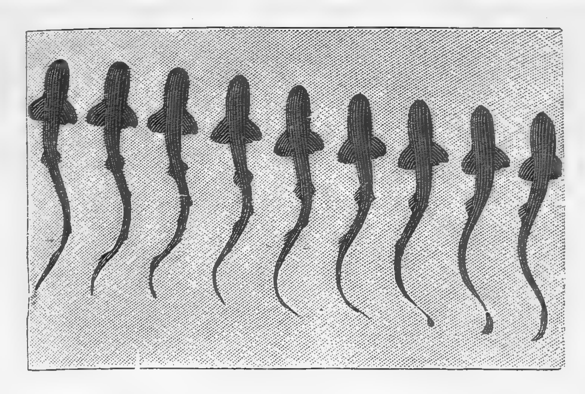


Fig. 229. — Natation du chien de mer (chronophotographie).

agit sur ce fluide à la façon d'un plan incliné, suivant des directions alternativement inverses. Borelli (1) avait déjà très bien saisi l'action propulsive de la queue des poissons.

C'est l'action de la queue qui constitue le mode de locomotion le plus puissant des poissons. Mais elle ne paraît guère s'exercer que pour la propulsion. C'est par ses coups de queue rapides et puissants que le saumon remonte les courants rapides et même les cascades. Quant aux nageoires latérales, chez la plupart de nos poissons d'eau douce, elles ne servent que pour faire reculer l'animal, pour maintenir son équilibre ou pour le faire changer de direction.

Ce mode de locomotion par oscillation alternative d'une surface inclinée s'observe chez des espèces aquatiques appartenant à des classes très différentes. Certains mollusques pélagiques, comme *Carinaria*, agitent transversalement une sorte de palette flexible située à l'arrière de leur corps et progressent lentement, mais d'une façon sensiblement uniforme.

Chez les mammifères aquatiques, la queue joue pareillement le rôle de propulseur, mais parfois, comme chez la baleine, c'est dans le sens vertical que se font les oscillations. Le castor, en nageant, se sert aussi de sa queue plate et flexible, et l'agite également dans le sens vertical.

Pour bien connaître le mécanisme de la natation chez les différentes espèces animales, il faudrait disposer d'aquariums spéciaux et bien éclairés, qui permettraient d'appliquer à l'étude de ces mouvements la chronophotographie qui ne déterminerait toutes les phases. Cette étude est d'autant plus importante qu'elle fournirait à l'industrie humaine des types de propulseurs très

(1) Borelli, *Loc. cit.*

puissants, et qu'il ne serait sans doute pas impossible d'imiter. Déjà, l'action de la nageoire caudale a été reproduite sur des embarcations au moyen d'une sorte de gouvernail flexible, auquel on imprimait latéralement des mouvements alternatifs rapides. D'autres fois, on se servait de lames métalliques flexibles, auxquelles on imprimait des oscillations autour d'une charnière horizontale. Il n'est même pas besoin d'imprimer un mouvement à ces lames, si l'embarcation qui les porte est placée dans une eau agitée de clapotis. C'est alors l'oscillation de l'eau elle-même qui fait plier en sens inverse ces lames métalliques, de telle sorte que la force de l'eau se décompose elle-même sur ces surfaces inclinées, et produit une propulsion du bateau. Ce mouvement n'est malheureusement pas assez rapide pour être pratiquement utilisable.

Mouvement ondulatoire des nageoires. — Chez certains poissons, des nageoires règnent sur une grande longueur le long du corps. Chez la murène, par exemple, la nageoire dorsale est le siège d'ondulations qui vont de la tête à la queue, et dont les effets s'ajoutent à celui des ondulations du corps

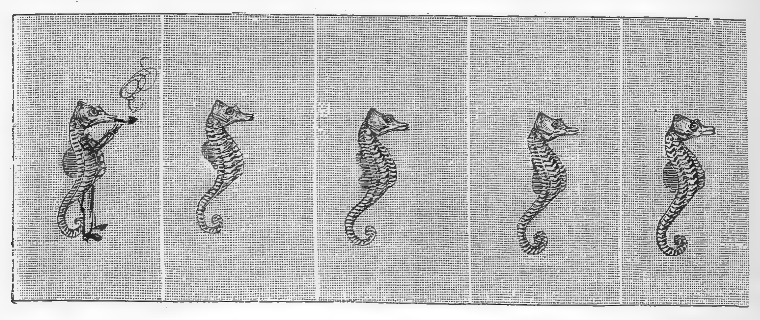


Fig. 230. — Mouvement de la nageoire dorsale de l'hippocampe (chronophotographie).

ou les remplacent. L'hippocampe présente à sa nageoire dorsale des ondulations du même genre, qui lui permettent de s'élever ou de se porter en avant sans le secours des autres nageoires. Ces vibrations sont trop rapides pour que l'œil puisse bien les saisir, mais elles sont mises en évidence par la chronophotographie (fig. 230).

Ainsi, en lisant de gauche à droite la série des images, on voit d'abord que la nageoire est, dans toute son étendue, parallèle au plan médian du poisson, on en suit entièrement le contour arrondi. A la seconde image, une onde se forme à la partie inférieure et la nageoire s'infléchit latéralement, ce qui la fait paraître échancrée; l'instant d'après, l'onde est arrivée à la partie moyenne de la nageoire, dont la partie inférieure s'est déjà redressée, et l'encoche semble en occuper la partie moyenne; à la quatrième image, l'onde est arrivée en haut de la nageoire; à la cinquième, celle-ci est revenue à sa position première; une nouvelle onde va s'y former et se propager comme ci-dessus. Ce mouvement ascendant de l'onde s'accompagnait de descente et de propulsion de l'hippocampe.

Des ondulations analogues et symétriques se produisent dans les nageoires

latérales de la raie ; elles sont produites par des oscillations verticales des rayons de la nageoire et se propagent de la tête à la queue.

Pour rendre sensibles les phases de ce mouvement, nous avons recouru à la chronophotographie. L'animal est fixé sur un support immergé dans un aquarium transparent devant lequel on braque l'appareil chronophotographique.

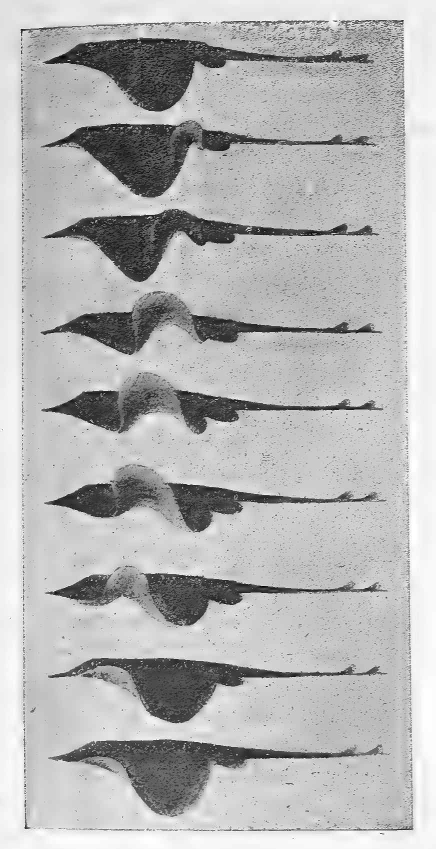


Fig. 231. — Mouvement des nageoires de la raie (chronophotographie).

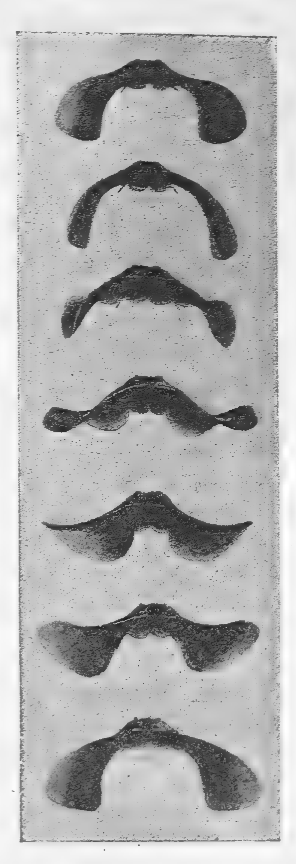


Fig. 232. — Mouvements de la nageoire de la raie vue d'avant (chronophotographie).

On l'excite au moyen d'une baguette, et l'on voit sur ses nageoires latérales courir une onde qui se transporte d'avant en arrière. La marche de cette onde est fixée par la figure 231 qui se lit de bas en haut.

L'onde naît du côté de la tête par un soulèvement de la nageoire, dont le bord libre forme un petit arc à convexité supérieure. Ce soulèvement se propage vers l'arrière, en même temps que s'abaisse la partie primitivement soulevée ; le maximum d'amplitude de l'onde correspond à la partie moyenne de la nageoire ; cette onde diminue peu à peu dans sa marche rétrograde et s'évanouit vers la racine de la queue. Au moment de la disparition de la pre-

mière onde, une nouvelle onde s'est formée du côté de la tête, et ainsi de suite, indéfiniment. La durée de la translation de l'onde est de neuf dixièmes de seconde environ; nous n'avons jamais observé deux ondes complètes à la fois sur la longueur de la nageoire.

Pour mieux comprendre la nature du mouvement ondulatoire de la raie, il est bon d'observer ce phénomène sous différents aspects. Vue par l'avant, la raie donne la série d'images représentées figure 232, et dont la succession se lit de bas en haut.

On y voit que si la base de la nageoire s'abaisse en un point, l'extrémité flexible de celle-ci est, à ce niveau, soulevée par la résistance de l'eau. De sorte que la nageoire se compose d'une partie active située à sa base et formée de rayons cartilagineux que des muscles spéciaux élèvent et abaissent tour à tour, et d'une partie passive flexible qui, en s'élevant et en s'abaissant, se courbe en sens divers par l'effet de la résistance de l'eau. Ce mécanisme, nous le connaissons déjà dans l'action de la nageoire caudale des poissons; nous le retrouverons dans la fonction des ailes chez les insectes et chez les oiseaux. Partout s'observe l'action d'une surface oblique agissant sur un fluide.

Si les rayons des nageoires latérales s'élevaient et s'abaissaient tous à la fois, l'action de chacun de ces organes tendrait à chasser l'eau en dehors, et les deux poussées résultantes se neutraliseraient l'une par l'autre. Mais, grâce à la succession des mouvements de ses différents rayons, la nageoire ondule d'avant en arrière; elle tend à repousser l'eau vers l'arrière, et par conséquent à propulser le poisson.

Le sens de la propagation de l'onde est déterminé par l'ordre dans lequel se succèdent les mouvements dans la série des rayons de la nageoire. Si le mouvement commençait dans les rayons postérieurs de la nageoire pour se transmettre de proche en proche et d'arrière en avant, l'onde suivrait la même direction et l'animal rétrograderait. Je n'ai jamais observé ce phénomène sur la raie, mais il est fréquent chez le calmar. Quand ces mollusques sont réunis en grand nombre, on les voit d'ordinaire, tous ensemble, se porter alternativement vers une extrémité, puis vers l'autre, de l'aquarium où ils sont enfermés. Dans ces mouvements, les calmars ne se servent pas de leur siphon, mais progressent exclusivement par le jeu des nageoires; or, suivant le sens de la translation de l'animal, le sens de l'onde se renverse : si le calmar progresse la tête en avant, l'onde chemine d'avant en arrière; si le calmar voyage en sens contraire, l'onde marche d'arrière en avant.

Ces ondulations latérales sont fréquentes dans la locomotion des animaux marins. Elles s'expliquent très facilement par l'anatomie de la raie, de la torpille, de l'hippocampe, etc., partout où la nageoire est formée d'une série de rayons munis chacun de faisceaux musculaires destinés à les élever et à les abaisser tour à tour. Mais l'ondulation latérale s'observe aussi chez des mollusques où cette organisation compliquée n'existe pas, chez l'aplysie par exemple.

Un autre mode de progression dans l'eau consiste dans le mouvement alternatif d'organes qui trouvent une résistance plus grande dans un sens

que dans l'autre. La patte des oiseaux palmipèdes agit de cette façon; elle se referme et présente une surface étroite quand elle se porte en avant, s'ouvre et étale ses membranes interdigitales quand elle se porte en arrière. Cette action se voit très bien sur les pattes d'un cygne qui nage sur une eau limpide.

Malgré sa complication apparente, ce mouvement s'exécute tout naturellement; il est en quelque sorte automatique. Borelli a signalé le premier une disposition anatomique par laquelle est établie une solidarité entre les mouvements de flexion du tarse et ceux des phalanges. De telle sorte qu'un oiseau se posant sur une branche fléchit son tarse par le poids de son corps, et du même coup étreint la branche entre ses phalanges (1). C'est par le même mécanisme qu'un oiseau qui marche ferme ses doigts quand il porte la patte en avant, les écarte dans le mouvement en arrière.

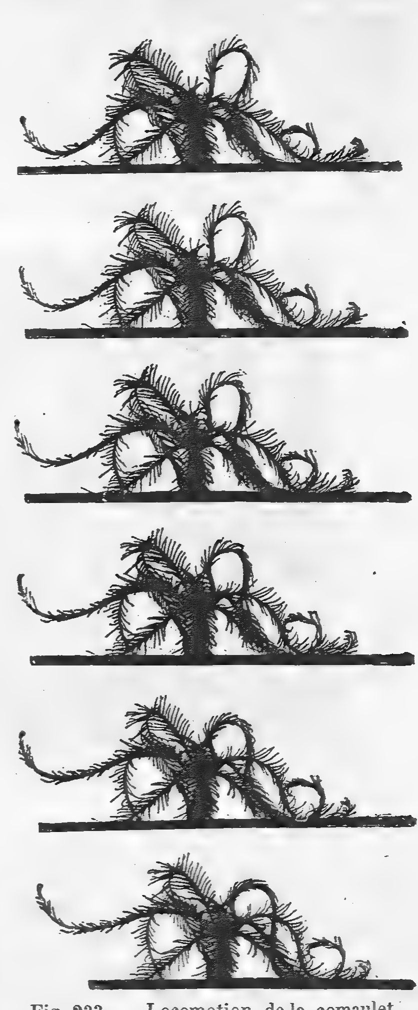


Fig. 233. — Locomotion de la comaulet.

Les comatules progressent par l'agitation de leurs bras couverts de villosités, et qui trouvent dans l'eau des résistances inégales, suivant le sens de leurs mouvements. La chronophotographie nous a permis de suivre les phases de ce curieux mouvement.

Généralement fixée sur quelque appui solide comme une fleur sur la tige qui la porte, la comatule exécute avec ses bras des mouvements lents et obscurs. Mais si on l'arrache à son support et si on l'excite au moyen d'une baguette, on la voit au bout d'un certain temps agiter ses bras avec rapidité; ce mouvement a pour effet de faire progresser l'animal. L'action des bras étant symétrique, la résultante de ces mouvements se fait suivant l'axe du calice sur lequel sont implantés les bras. En inclinant en sens divers l'axe de son calice, l'animal change à volonté sa direction.

Les bras de la comatule sont au nombre de dix; il y en a cinq qui s'élèvent et cinq qui s'abaissent en même temps. Deux bras consécutifs sont animés

(1) Borelli, *De Motu animalium*, prop. CL, tabl. XI, fig. 7.

de mouvements de sens contraires, ceux qui s'élèvent se rapprochent de l'axe du corps, ceux qui s'abaissent s'en éloignent. Pendant l'élévation des bras, les cirres qui les recouvrent s'accolent à leur surface et sont peu visibles, mais pendant la phase d'abaissement du bras les cirres se relèvent et en hérissent la surface. Toutes ces villosités rencontrent dans la résistance de l'eau un point d'appui pour la propulsion de l'animal.

La figure 233, dont les images se lisent de bas en haut, rend compte des phases de ce mouvement qui est vraiment curieux et saisissant quand on l'observe pour la première fois.

Un autre mode de locomotion consiste dans l'éjection d'une certaine quantité de liquide. Un grand nombre d'espèces animales obtiennent cet effet par la contraction d'une poche musculeuse. Les méduses, les poulpes, les seiches, les calmars se propulsent de cette manière dans une direction opposée à celle du jet de liquide qu'ils lancent.

La figure 234 montre les mouvements de la méduse qui resserre et dilate tour

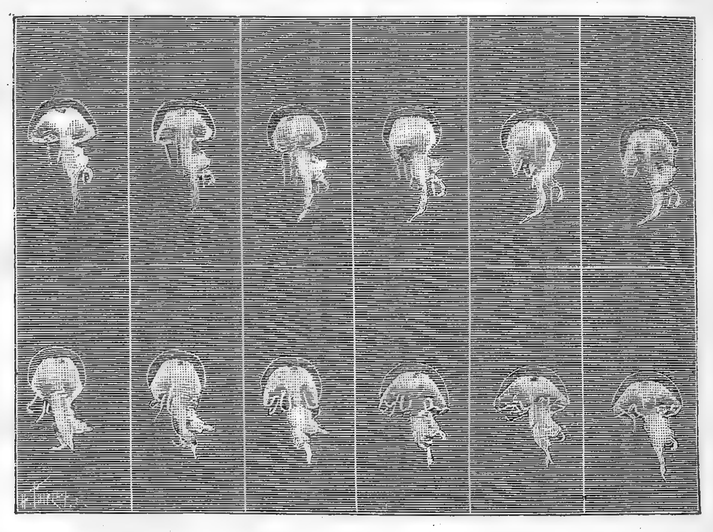


Fig. 234. — Contractions et relâchements de l'ombrelle de la méduse (chronophotographie).

à tour son ombrelle. La transparence des tissus permet d'apercevoir certains détails de la structure intérieure de l'animal. Les douze images successives montrent les phases d'un mouvement de resserrement et de dilatation. Comme l'eau s'échappe de l'ombrelle par en bas, chaque contraction produit sur la méduse une poussée ascendante, et comme la densité de ce mollusque est un peu supérieure à celle de l'eau, il redescend un peu dans l'intervalle des contractions, ce qui produit un mouvement d'oscillation sur place. Si les mouvements de l'ombrelle sont énergiques, ils impriment à l'animal une propulsion saccadée dans laquelle la progression se fait dans le sens de la convexité de l'ombrelle. Aussi l'animal doit-il incliner son corps en sens divers, suivant le point vers lequel il veut se diriger.

Sur les bords de l'ombrelle se trouve une couronne de franges flexibles qui s'inclinent en sens divers par l'effet de la résistance de l'eau et fonctionnent alors comme une nageoire flexible circulaire analogue à celles dont le mécanisme a été décrit plus haut. La locomotion de la méduse se fait donc par un procédé mixte, à la fois par éjection de liquide et par l'action alternative d'une sorte de nageoire circulaire.

Le poulpe, la seiche et le calmar sont munis d'une poche ou siphon qui par sa contraction brusque chasse un jet de liquide puissant dont la réaction imprime à l'animal un mouvement de recul rapide. Chez le calmar et la seiche, ce mode de propulsion n'est pas le seul dont l'animal dispose ; il nage aussi par l'agitation de ses membranes latérales. Chez le poulpe, les bras, munis de ventouses, lui permettent de prendre adhérence sur les objets extérieurs et de ramper à leur surface. Mais c'est la contraction du siphon qui intervient chaque fois que l'animal veut fuir ou changer rapidement de place. La figure 234 montre ce genre de mouvement.

Certaines larves d'insectes, celles de la libellule par exemple, lancent par l'anus un jet de liquide dont la réaction les porte brusquement en avant; cela n'empêche pas ces larves de se servir aussi de leurs pattes et de marcher à la façon des insectes, sur le sol, au fond de l'eau.

Certains mollusques bivalves ont encore un genre de locomotion analogue. Par les jours de chaleur on les voit, au fond de l'aquarium, entr'ouvrant leur coquille aux bords de laquelle sortent les franges du manteau, puis tout à coup ils s'élancent, ouvrant et fermant d'une façon rapide leurs deux valves. Les mollusques s'élèvent ainsi dans l'aquarium et y voltigent en quelque sorte, parcourant plusieurs mètres avant de retomber sur le fond.

J'ai cru d'abord que ces mouvements étaient dus à ce que chaque rapprochement brusque des valves laissait échapper par leur intervalle un jet d'eau rapide. Mais cette supposition est inadmissible, en raison même du sens dans lequel l'animal se déplace. Il progresse en effet en dirigeant l'ouverture des valves en avant; c'est donc du côté de la charnière que doit s'échapper le liquide. Or, il existe aux deux extrémités de la charnière et sur chacune des valves, deux rainures qui forment par leur adossement deux canaux par lesquels le liquide doit s'échapper à chaque brusque rapprochement des valves, tandis que les franges du manteau fermeraient l'issue du liquide par leur bord libre.

Cette interprétation hypothétique pourrait être contrôlée expérimentalement, si l'on introduisait dans l'intérieur de la coquille une substance colorante capable de rendre sensible l'échappement du liquide.

Nous n'avons cité cet exemple que pour donner une idée de l'extrême variété des formes de la locomotion aquatique.

Il faudrait décrire encore les modes curieux de locomotion des batraciens, ceux de la grenouille par exemple qui, aux divers stades de ses métamorphoses, passe du mode de locomotion des poissons à nageoire caudale à un type très voisin de la natation de l'homme, lorsque la queue a disparu et que les membres ont pris tout leur développement. Dans la phase intermédiaire l'animal possède encore sa queue et a déjà ses pattes postérieures assez déve-

loppées pour se servir efficacement de ces deux sortes d'organes dans un mode de locomotion mixte.

La tortue aquatique marche sur le fond d'un aquarium avec l'allure du pas (1). C'est avec la même succession de mouvements qu'elle s'élève dans

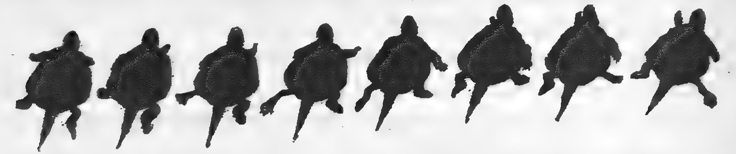


Fig. 235. — Tortue nageant dans l'eau, allure quadrupède (chronophotographie).

l'eau (fig. 235) pour aller respirer à la surface et qu'elle redescend lorsqu'elle a renouvelé sa provision d'air.

Chez les insectes aquatiques, les types de locomotion sont d'une infinie variété; ce n'est pas ici le lieu d'en tenter l'énumération. Il sera toutefois d'un grand intérêt d'analyser ces différents genres de propulsion, car plusieurs d'entre eux peuvent fournir à l'industrie de l'homme des modèles dont il pourra s'inspirer utilement.

LOCOMOTION AÉRIENNE. — VOL DES INSECTES

Sommaire. — Forme d'une aile d'insecte; schéma de l'aile. — Mouvements des ailes des insectes. — Théorie de Pettigrew; trajectoire lumineuse. — Changement d'inclinaison de l'aile pendant son parcours. — Détermination du sens du mouvement de l'aile. — Soufflerie et réaction qui résulte des mouvements de l'aile; schéma du mécanisme de l'aile. — Théorie mécanique du vol; insecte artificiel. — Changements de direction du vol. — Vitesse de l'aile, fréquence de ses battements. — Rapport de la fréquence à la taille de l'insecte; synergie des deux ailes. — Démonstration de la trajectoire et des changements de place par la méthode graphique. — Étude du vol des insectes par la chronophotographie. — Étude par les vivisections. — Vol plané des insectes.

Le vol des insectes étant plus simple que celui des oiseaux, c'est par lui que nous commencerons l'étude de la locomotion aérienne.

Si l'on saisit avec une pince la base de l'aile d'un insecte et qu'on souffle sur sa surface membraneuse, on la voit s'incliner sous la pression de l'air et tourner autour de son bord antérieur qui reste rigide. C'est que ce bord con-

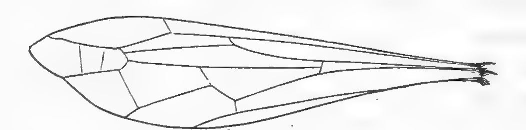


Fig. 236. — Aile d'un insecte.

tient (fig. 236) des nervures puissantes qui l'empêchent de fléchir sous l'effort du courant d'air. Réciproquement, quand un insecte agite ses ailes dans l'air

(1) Voy. p. 230 à 232, la succession des mouvements qui caractérisent le pas des quadrupèdes.

immobile, la résistance éprouvée alternativement par les deux faces de l'aile incline cette membrane en sens divers.

Ces flexions alternatives de l'aile de l'insecte sont l'essence de son action propulsive. Nous avons déjà vu, dans la natation des poissons, la flexion des nageoires contre la résistance de l'eau produire une propulsion semblable. Mais une expérience directe va rendre cet effet plus saisissant.

Construisons, avec des tiges de bambou, de la ficelle et du papier, une grande aile artificielle ayant la forme représentée figure 237. Cette aile, fabriquée sui-

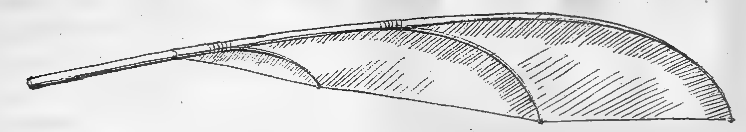


Fig. 237. — Aile factice pour montrer les effets de la résistance de l'air.

vant la méthode que les enfants emploient pour faire un cerf-volant, aura les qualités nécessaires pour la démonstration. Elle présente sur l'un de ses bords une nervure rigide formée par le bambou recourbé, duquel se détachent de petites nervures secondaires plus flexibles ; l'autre bord est formé par une ficelle qui relie au bambou les extrémités des différentes nervures ; le tout est recouvert de papier. Ainsi formée, cette aile est rigide par l'un de ses bords et flexible par l'autre ; une pression exercée sur la surface du papier lui fait prendre une inclinaison plus ou moins prononcée.

Prenons dans les mains le manche de bambou et essayons de frapper l'air à plat avec la surface de l'aile ; il sera absolument impossible de diriger le coup verticalement en bas. Plus nous y mettrons de force, et par conséquent de vitesse, plus nos bras seront fortement déviés du côté de la nervure de l'aile. Rien n'est plus saisissant que cette expérience qui donne la sensation de la réaction de l'air et en fait comprendre la puissance avant toute explication.

Voyons maintenant comment cette propriété de l'aile intervient dans le mécanisme du vol.

En 1867, M. Pettigrew, observant au soleil le mouvement du vol d'un insecte, vit que la trajectoire de chacune des ailes formait un 8 de chiffre. Il interpréta de la manière suivante cette apparence représentée figure 238. L'auteur anglais pense que la lemniscate est formée par un seul mouvement de l'aile, de droite à gauche, par exemple, comme le montre la direction des flèches. Il suppose que chacune des branches du 8 est formée par l'un des bords de l'aile : si la branche épaisse est formée par le bord antérieur, le bord postérieur suit la branche mince. De là résulterait un retournement complet de la surface de l'aile, en sorte que le bord qui regarderait en haut dans la moitié gauche de la figure, regarderait en bas dans la moitié droite.

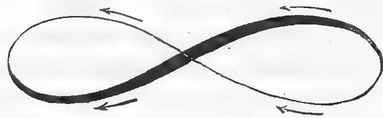


Fig. 238. — Schéma de la trajectoire de l'aile d'un insecte, d'après Pettigrew.

J'ignorais ce fait ou l'avais oublié lorsque mes observations personnelles me

conduisirent à une interprétation toute différente des mouvements de l'aile des insectes.

Appliquant à l'extrémité de l'aile d'une guêpe une petite paillette d'or battu et examinant au-devant d'un fond noir les mouvements de l'insecte vivement éclairé par le soleil, je vis que la paillette d'or formait la figure 239 où la pointe de l'aile décrit une trajectoire en 8 de chiffre; que l'une des branches était plus éclatante que l'autre ; enfin, qu'en changeant l'orientation de l'insecte on changeait l'éclat relatif des deux branches de la figure lumineuse : qu'on éteignait celle qui d'abord était la plus brillante et qu'on avivait l'éclat de celle qui en avait le moins.

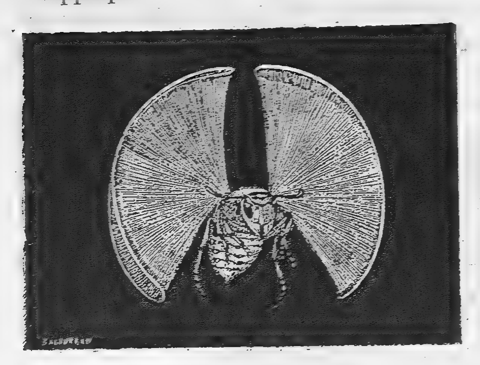


Fig. 239. — Trajectoire d'une paillette d'or placée à l'extrémité de l'aile d'un insecte.

De cette expérience, je crois pouvoir tirer une théorie du vol de l'insecte qui va être exposée et appuyée sur des démonstrations expérimentales.

Et d'abord, la forme en 8 n'est pas produite, comme le pensait Pettigrew, par les deux bords de l'aile, dont chacun suivrait l'une des branches ; en effet, quelque petite que soit la paillette d'or fixée à l'extrémité de l'aile, ce point brillant trace, à lui seul, la figure complète.

Or, Wheatstone, puis Lissajous, ont montré comment, en imprimant à un point brillant des vibrations perpendiculaires entre elles et de périodes différentes, on obtenait diverses formes optiques. La forme en 8 de chiffre résulte de la composition de deux vibrations doubles dans un sens avec une vibration double dans l'autre. On peut donc conclure que, dans ses battements rapides, l'aile de l'insecte décrit deux vibrations dans le sens de la petite largeur de la lemniscate et une seule vibration dans l'autre sens.

Enfin, le changement d'éclat que prend la paillette brillante quand on change l'orientation de l'insecte m'a paru tenir à ce que le plan de l'aile change d'inclinaison aux différentes phases de son parcours et présente alors des orientations plus ou moins favorables à la réflexion de la lumière.

Or, on se souvient que l'aile artificielle (fig. 237) avec laquelle on frappe l'air s'incline sur la résistance de ce fluide et qu'elle se dévie du côté de sa nervure. Dans un mouvement accéléré d'abaissement de l'aile, on verra celle-ci s'infléchir et se porter du côté de sa nervure, puis revenir à sa forme initiale à la fin de l'abaissement, quand sa vitesse s'éteint ; dans la remontée de l'aile, une déviation pareille se produira avec retour à la forme initiale. Ainsi, pour une oscillation verticale complète, élévation puis abaissement de l'aile, il se produira deux oscillations horizontales, de façon que l'extrémité de l'aile aura décrit une lemniscate. Et dans ce double mouvement, il aura suffi d'une action musculaire fort simple, celle qui aura produit l'élévation et l'abaissement de l'aile ; les mouvements plus complexes que l'on observe

sont entièrement dus à la résistance de l'air qui incline la surface de l'aile et la dévie du côté de sa nervure.

Si cette théorie est exacte, on doit pouvoir imiter l'aspect des mouvements de l'aile d'un insecte avec une aile artificielle formée d'une nervure et d'un voile flexible, à laquelle on imprimera de simples oscillations dans un plan perpendiculaire à celui de l'aile.

C'est, en effet, ce qui s'observe sur le petit appareil représenté figure 240.

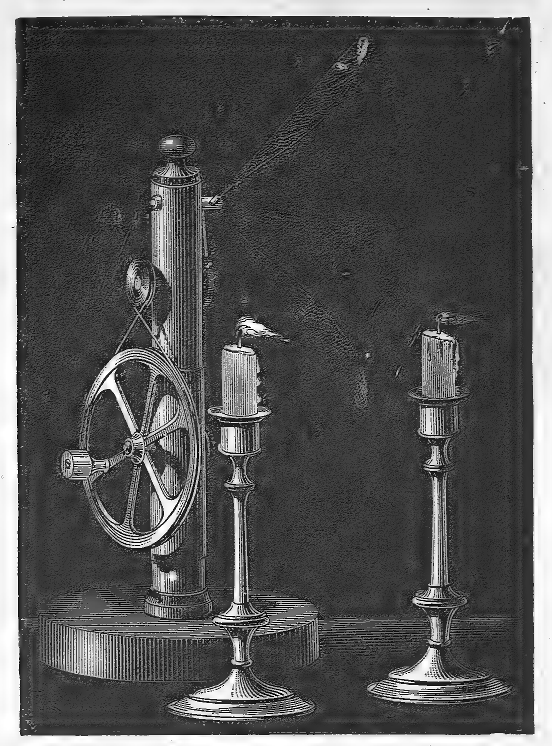


Fig. 240. — Schéma de l'action de l'aile d'un insecte.

Une manivelle actionnant une bielle imprime, à une tige flexible, un mouvement de va-et-vient dans un plan vertical. Adaptons une membrane semblable à celle des ailes de l'insecte sur cette tige qui en constituera la nervure, et imprimons à cette aile factice de rapides mouvements d'oscillation. Nous verrons se reproduire tous les mouvements qu'exécute l'aile d'un insecte véritable.

Une paillette brillante fixée à l'extrémité de cette aile factice décrira la figure du 8 ; on constatera de même que l'inclinaison de la membrane alaire change deux fois pendant une double oscillation.

Il est bien évident que le mécanisme moteur, représenté figure 240, ne peut imprimer à l'aile que des oscillations dans un plan ; c'est donc la résistance de l'air qui produit les déviations latérales de l'aile, en agissant sur sa surface inclinée.

Si la résistance de l'air agit sur l'aile, celle-ci, à son tour, agit sur l'air. Si la nervure de l'aile est repoussée dans un sens, l'air doit être repoussé dans l'autre, de sorte qu'une soufflerie se produira du côté d'abord flexible de l'aile. On peut s'en assurer en plaçant, de ce côté, une bougie ; la flamme sera fortement déviée ou même éteinte par le souffle de l'aile. En plaçant, au contraire, cette flamme du côté de la nervure, c'est une aspiration qu'on observera ; la flamme sera fortement attirée vers l'aile.

Ainsi, la théorie des mouvements de l'aile est la suivante : L'action des muscles imprime à l'aile un simple mouvement d'oscillation ; la résistance de l'air incline la membrane de l'aile, et, agissant sur cette surface sous une incidence oblique, se décompose en deux forces perpendiculaires entre elles. De ces forces, l'une résiste aux mouvements oscillatoires de l'aile, tandis que l'autre agit sur la nervure pour l'infléchir.

Cette série de phénomènes est représentée par la figure 241, très différente de celle qui représente les hypothèses de M. Pettigrew. En effet, d'après moi, la lemniscate exige pour se produire, non pas un simple mouvement d'aile, mais une oscillation double, un va-et-vient ; le plan de l'aile ne se retourne pas complètement, mais s'incline seulement dans un sens puis dans l'autre ; la direction du mouvement de l'aile est différente dans les deux branches de la lemniscate, comme le montrent les flèches indicatrices. Cette dernière proposition, qui implique l'existence des deux autres, va être démontrée par une expérience sur l'insecte vivant.

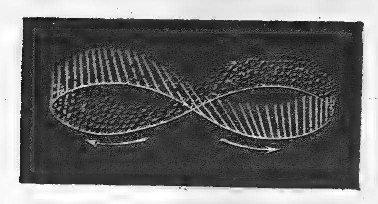


Fig. 241. — Trajectoire de l'aile d'un insecte avec ses changements de plan.

On noircit à la fumée d'une bougie une petite baguette de verre filé ; le plus léger frottement à la surface de cette baguette enlèvera le noir de fumée au point où le contact se sera produit. Cela va nous permettre de déterminer le sens du mouvement de l'aile en chaque point de sa trajectoire.

Pour cela, saisissons par l'abdomen, au moyen d'une pince, un insecte, mouche ou abeille ; l'animal, pour se dégager, exécutera les mouvements du vol, et nous verrons apparaître la trajectoire en lemniscate de chacune de ses ailes (fig. 242). Cherchons à introduire la baguette enfumée dans l'espace parcouru par l'aile ; suivant le sens du mouvement de celle-ci dans la région explorée, le noir de fumée sera enlevé sur l'un ou l'autre côté de la baguette de verre.

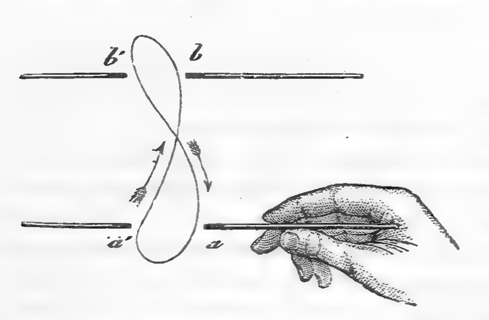


Fig 242. — Détermination du sens du mouvement de l'aile d'un insecte.

En explorant ainsi les points *a* et *a'*, *b* et *b'*, on voit que le sens du mouvement est bien celui que représente la direction des flèches et que la théorie avait fait prévoir.

Quand les boucles de la lemniscate sont assez largement ouvertes, on y peut introduire à une assez grande profondeur la baguette enfumée, sans qu'elle soit dépouillée du noir qui la recouvre, cela prouve qu'en ces points existent des espaces libres, et que l'aile tout entière se meut autour de ces espaces.

Mécanisme du vol des insectes. — Considérons un insecte diptère agitant ses deux ailes dans un plan horizontal, la nervure tournée en haut. Deux forces symétriques se produisent, tendant à soulever la nervure des ailes, à soutenir le poids de l'insecte et même à l'élever d'un mouvement plus ou moins rapide.

Ce mécanisme peut être imité au moyen d'un petit appareil (fig. 243), que

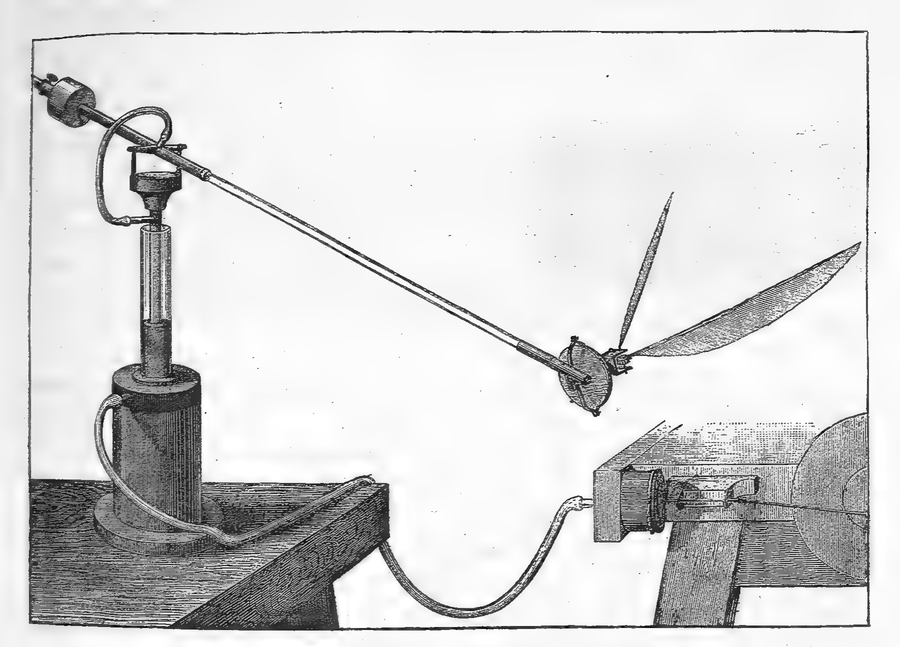


Fig. 243. — Insecte artificiel reproduisant le mécanisme du vol.

j'ai appelé l'*insecte artificiel.* A l'extrémité d'un tube de verre équilibré par un contrepoids, est une pompe à air qui actionne deux ailes formées chacune d'une nervure que prolonge en arrière une membrane flexible. Cette pompe est actionnée par une autre, avec laquelle elle communique par une série de tubes et par un axe pivotant. Des alternatives rapides de compression et de raréfaction de l'air dans tout le système produisent des battements simultanés des deux ailes.

On peut orienter à volonté l'insecte artificiel, de façon que ses ailes battent, soit dans un plan vertical, soit dans un plan horizontal, ou dans toute autre direction intermédiaire.

Quand les ailes battent dans un plan vertical, l'insecte entraîne le manège dans un mouvement de rotation rapide. Si, en déplaçant le contrepoids, on a

rendu l'insecte plus lourd et qu'on oriente ses ailes de façon qu'elles battent dans un plan horizontal, les battements produisent une force ascensionnelle qui soulève l'insecte malgré sa pesanteur.

Cette attitude des ailes s'observe fréquemment chez les diptères. On voit souvent les mouches voler sur place pendant assez longtemps et, si elles sont éclairées par le soleil devant un champ obscur, elles apparaissent comme suspendues au milieu d'un disque nébuleux placé horizontalement. Ce disque correspond au champ dans lequel se meuvent les deux ailes.

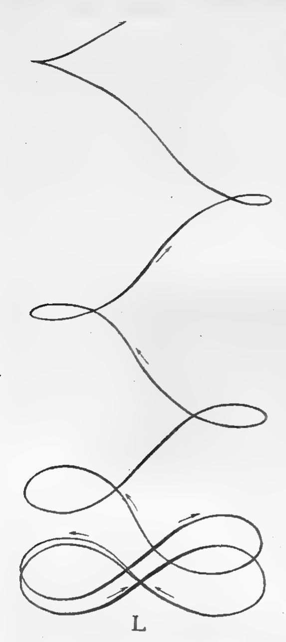


Fig. 244. — Transformation de la trajectoire de l'aile d'un insecte par l'effet de la translation.

Parfois l'insecte s'élève brusquement, c'est qu'il agite sans doute ses ailes avec plus d'amplitude ou plus de fréquence, accroissant ainsi la force qui le soulève. D'autres fois, il se jette de côté par l'action prédominante de l'une des ailes.

Plus souvent, l'insecte incline en sens divers son abdomen, et, déplaçant ainsi son centre de gravité, incline le plan d'oscillation de ses ailes, et par suite la direction de son vol qui est toujours perpendiculaire à ce plan. Sur des abeilles qui volent très vite, on voit souvent le corps fort incliné et le plan d'oscillation des ailes s'approcher de la verticalité.

Quand un insecte se transporte avec rapidité, la trajectoire de son aile n'est plus cette lemniscate qui s'observe dans le vol captif ; cette figure, déployée par la translation, se transforme en une sorte de sinusoïde qui peut être démontrée par la photographie (fig. 244).

Vitesse de l'aile. — La résistance de l'air croît sensiblement comme le carré de la vitesse du mouvement qui lui est opposé ; l'aile de l'insecte, pour trouver sur l'air un appui efficace, doit donc se mouvoir avec rapidité.

Les parties voisines du corps ayant nécessairement peu de vitesse, ont peu d'action ; l'aile en ce point est rétrécie et réduite à un simple pédicule. Près de son extrémité distale, au contraire, l'aile s'élargit. Comme l'amplitude de ses battements est en général assez faible, c'est par une grande fréquence qu'ils obtiennent la vitesse nécessaire. Cette fréquence est trop grande pour que l'œil puisse la saisir, mais l'oreille permet de l'apprécier d'après le son produit par l'insecte qui vole.

Toutefois, plusieurs causes d'erreur rendent insuffisant ce moyen d'évaluation. On peut se demander tout d'abord si les mouvements des deux ailes d'un diptère ou des quatre ailes d'un hyménoptère sont assez synchrones pour que leurs vibrations se confondent en un unisson parfait. En outre, les variations de tonalité qu'on observe dans le son produit par le vol expriment-elles toujours un changement dans la fréquence des battements ?

Sur ce dernier point, l'observation nous montre que le bourdonnement d'un insecte passe du grave à l'aigu quand il s'approche de notre oreille, de l'aigu au grave lorsqu'il s'en éloigne. Ici intervient visiblement l'influence de la translation de l'animal sur la tonalité du son; ce phénomène est identique à celui qu'on observe en chemin de fer quand un train nous croise en sifflant : l'acuité du sifflement augmente tant que le train s'approche; le son devient plus grave lorsqu'il s'éloigne après le croisement.

Pour apprécier plus exactement la fréquence des battements des ailes, il faut recourir à l'inscription de ces mouvements. La chose est facile pour le vol captif; il suffit d'approcher l'insecte de la surface d'un cylindre enfumé qui tourne avec une vitesse connue. Dès que la pointe de l'aile effleure la surface du cylindre, elle y laisse la trace de chacun de ses battements sous forme de petits points blancs dépouillés du noir de fumée, et d'après le nombre de ces points tracés en un temps donné on mesure aisément la fréquence des coups d'aile. Sur la figure 245, on voit, en même temps que ces pointillés,

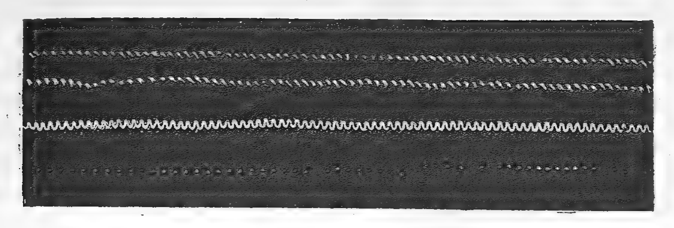


Fig. 245. — Détermination graphique de la fréquence des coups d'ailes d'un insecte.

la courbe sinusoïdale d'un diapason de 250 vibrations qui sert à mesurer exactement la vitesse de rotation du cylindre. Cette méthode a donné pour l'aile d'un bourdon 240 battements par seconde; pour la mouche commune 330 battements; pour l'abeille 190; pour la guêpe 110; pour le macroglosse du caille-lait 72; pour la libellule 28; enfin, pour le papillon (piéride du chou) 9.

Plus l'insecte est petit, plus les battements de ses ailes ont de fréquence; cette loi se retrouvera également pour le vol des oiseaux.

Synchronisme des battements des ailes. — La méthode graphique permet également de constater que les deux ailes d'un insecte se meuvent avec un synchronisme parfait; il suffit d'orienter l'insecte de telle sorte que les pointes des ailes droite et gauche frottent à la fois sur la surface du cylindre. Elles laissent alors des traces absolument symétriques offrant un même nombre de points blancs tracés sur une même longueur de papier.

L'inscription des mouvements de l'aile d'un insecte permet aussi de confirmer par une nouvelle méthode la forme en lemniscate de sa trajectoire. Toutefois, il ne faut point s'attendre à obtenir de cette façon la courbe complète; en effet, l'aile se mouvant autour de son attache au thorax, il s'ensuit que son extrémité libre décrit une courbe sphérique, et cette courbe ne peut être tangente que par un point avec la surface du cylindre. Toutefois, en exerçant une légère pression de la pointe de l'aile contre le papier, on peut

obtenir des traits plus ou moins étendus à chaque contact de l'aile; et suivant la partie de la lemniscate qui correspond à la tangence avec le cylindre, on inscrit tantôt le croisement des deux branches (fig. 246), tantôt l'une ou l'autre des boucles qui la terminent.

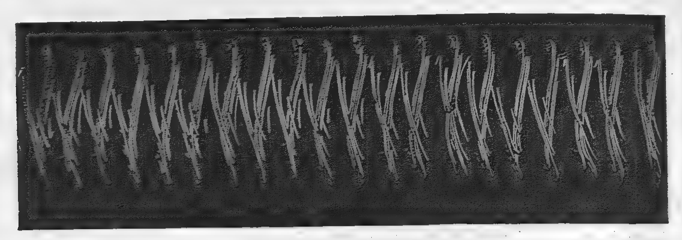


Fig. 246. — Inscription partielle de la trajectoire de l'aile d'un insecte : croisement des branches de la lemniscate.

Enfin, la méthode graphique permet encore de vérifier l'existence du changement de plan de la membrane alaire dans les deux phases inverses de son parcours. Chez certaines espèces, les ailes sont couvertes d'un léger duvet à leur face supérieure, tandis que la face inférieure en est dépourvue; le macroglosse du caille-lait est de ce genre. En orientant l'animal de telle sorte que le bord postérieur de son aile vienne seul au contact du papier, on obtient la figure 247, qui montre que l'aile frottait alternativement par sa face

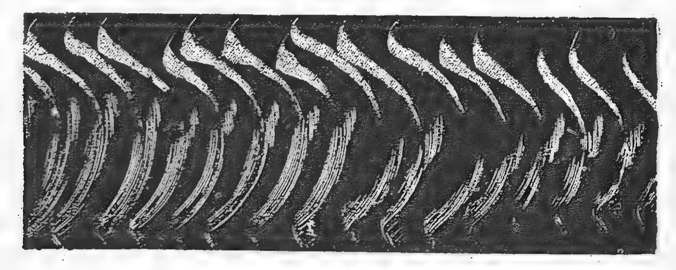


Fig. 247. — Changements de plan de l'aile d'un insecte, démontrés par la méthode graphique.

villeuse et par sa face lisse. C'est la preuve du changement d'inclinaison de sa surface suivant le sens de ses mouvements.

Toutes ces expériences faites sur le vol captif rendaient extrêmement probable que les choses se passaient de même façon dans le vol libre. J'ai pu en acquérir la preuve au moyen de la photographie instantanée dans les conditions suivantes.

Analyse du vol des insectes par la chronophotographie. — La chronophotographie, qui saisit toutes les attitudes d'un animal en mouvement, devait pouvoir révéler les aspects successifs que prend l'aile d'un insecte aux différents instants de son vol. Mais, en raison de la rapidité extrême du mouvement de l'aile, il fallait réduire considérablement le temps de pose; d'autre part, il ne fallait pas atténuer proportionnellement l'intensité de l'éclai-

rement. Ces exigences assez difficiles à concilier ont été satisfaites par la disposition suivante.

Et d'abord, pour obtenir une grande intensité de lumière, même avec les temps de pose les plus courts, j'ai photographié l'insecte se détachant en silhouette sur le disque du soleil. La figure 248 montre, vers la droite, un faisceau de lumière parallèle qui tombe sur la lentille C. Immédiatement en arrière de la lentille, on tient l'insecte captif au moyen d'une pince. De ce point qui représente la source lumineuse, les rayons convergent, à travers

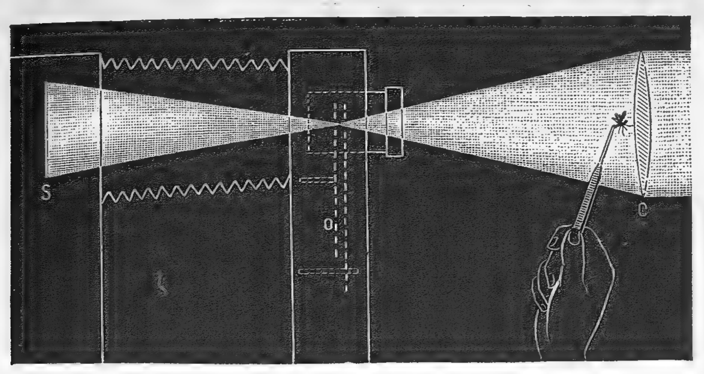


Fig. 248. — Schéma de la disposition qui sert à la chronophotographie du mouvement des ailes d'un insecte.

l'objectif du chronophotographe, sur une lame de métal (O, ligne pointée) percée d'un petit trou qui forme le diaphragme de l'objectif (1). Après avoir traversé ce diaphragme, les rayons divergent et s'étalent sur la plaque sensible S, où se peint la silhouette de l'insecte. Comme le diaphragme O n'a guère que 1 ou 2 millimètres de largeur, le mince faisceau de lumière qui le traverse peut être admis ou interrompu en des temps extrêmement courts au moyen d'un disque obturateur muni d'une fente très étroite et tournant avec une grande rapidité. En diminuant la largeur de cette fenêtre et en augmentant la vitesse du disque, on peut réduire le temps de pose à 1/25000e de seconde; cela donne des images parfaitement nettes et bien suffisamment éclairées.

Encouragé par ce succès, j'ai tenté de photographier les attitudes de l'aile dans le vol libre et y suis arrivé de la façon suivante : Au-devant de l'objectif photographique on place un tube carré fermé par une vitre en avant. L'insecte introduit dans cet espace clos se porte naturellement du côté de la lumière et vole contre la vitre, ainsi qu'on le voit faire aux insectes enfermés dans nos appartements. C'est pendant ce vol qu'on prend une série d'images photographiques.

La figure 249 montre deux tipules introduites ensemble dans la caisse de l'appareil; l'une d'elles, en haut de la figure, s'est posée contre la vitre et

(1) La longueur focale de la lentille du condensateur doit être au moins le double de celle de l'objectif.

s'y tient immobile, les ailes étalées; l'autre vole et présente un aspect très différent. Sur la tipule immobile, les ailes sont étalées dans un plan vertical, c'est-à-dire parallèlement à la vitre; sur l'insecte qui vole, les ailes, inclinées

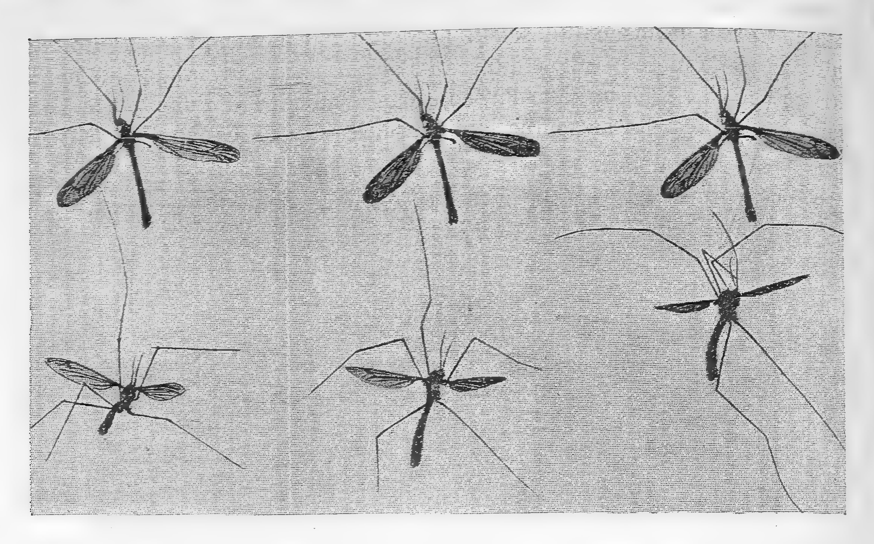
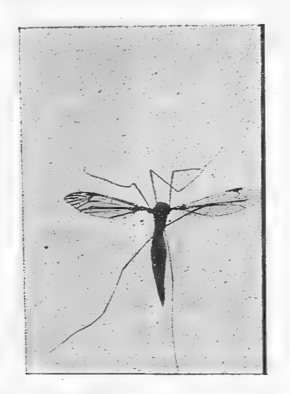


Fig. 249. — Deux tipules, l'une immobile en haut de la figure, l'autre au vol (chronophotographie).

par la résistance de l'air, se présentent obliquement, et leur projection sur la plaque sensible les fait paraître étroites et pointues, très différentes des ailes larges et arrondies de l'insecte immobile. Ce rétrécissement apparent de l'aile pendant le vol permettrait même d'en apprécier l'inclinaison,



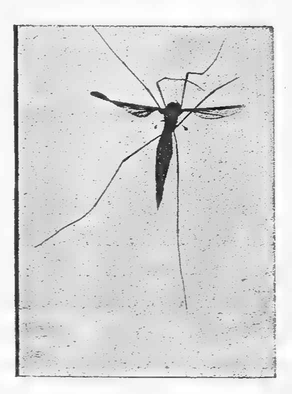


Fig. 250. — Différentes attitudes des ailes d'une tipule au vol (chronophotographie)

puisque la projection de la largeur de l'aile correspond au sinus de l'angle de son plan avec la verticale. D'après cela, sur la troisième image de la tipule volante, l'inclinaison du plan de l'aile serait d'environ 50 degrés;

cette inclinaison, du reste, change nécessairement comme la vitesse de l'aile aux différents points de la trajectoire. Enfin, comme la vitesse de l'aile est plus grande vers son extrémité qu'à sa base, l'inclinaison aux différents points de la membrane doit produire, à certains instants, une véritable torsion. Cette torsion, que la théorie faisait prévoir et que l'on observe sur les ailes artificielles, la photographie nous l'a montrée sur l'animal vivant ; elle est extrêmement apparente sur l'aile gauche de la tipule (figure 250, deuxième image).

Les changements de vitesse et de direction de l'aile pendant le vol doivent produire une grande variété dans l'inclinaison de sa surface ; ces changements d'inclinaison impliquent même cette conséquence, que l'aile passe à certains instants par la verticalité. Cela s'observe dans la première image de la même figure où l'aile, vue normalement à son plan, présente la même largeur apparente que sur l'insecte immobile.

Si l'on compare les images chronophotographiques des insectes avec celle des animaux à mouvements moins rapides, on constate que les images d'insectes ne donnent pas la série des phases du mouvement de l'aile, mais des attitudes isolées appartenant à des battements d'ailes différents. En effet, si un insecte donne cent cinquante coups d'ailes à la seconde et qu'on prenne seulement dix images par seconde, il se sera produit quinze battements d'ailes entre deux images consécutives (1).

Il y aurait pour le physiologiste un grand nombre d'observations et de comparaisons à faire relativement aux types du vol, qui varient chez les divers insectes avec le nombre et la forme de leurs ailes. Chez les diptères, deux ailes seulement sont développées ; les deux autres, atrophiées, constituent ce qu'on nomme les balanciers, sortes de petites masses que supporte un pédicule effilé. Ces organes participent aux mouvements des ailes et ne sont pas inutiles au vol, car après leur excision l'animal ne peut plus se diriger et, d'après les expériences de Tatin, décrit une trajectoire convexe supérieurement et retombe sur le dos.

(1) Faut-il pour cela désespérer de soumettre à l'analyse chronophotographique des mouvements si rapides? Nous ne le pensons pas. Et d'abord nous avons perfectionné notre appareil chronophotographique, de manière à obtenir jusqu'à cent dix images par seconde, images disposées en séries équidistantes. C'est déjà reculer beaucoup la limite de rapidité des phénomènes accessibles à l'analyse photographique. Mais il n'est même pas besoin d'un si grand nombre d'images lorsqu'on a affaire à des mouvements isochrones. On recourt alors à la méthode stroboscopique et l'on règle la fréquence des images de façon qu'elle soit à peu près un sous-multiple de celle des coups d'ailes.

Supposons donc qu'une expérience préalable, l'inscription graphique par exemple, nous ait appris que l'aile d'une guêpe bat cent dix fois par seconde. En prenant dix images de l'aile il arriverait que tous les onze battements l'ouverture de l'objectif retrouverait l'aile de l'insecte à une position identique, et immobile en apparence. Altérons un peu le rapport du nombre des éclairements par rapport à celui des coups d'ailes, de façon, par exemple, qu'entre deux éclairements successifs l'insecte ait donné onze battements et 1/10e ; l'aile apparaîtra à une phase un peu plus avancée de son parcours ; la troisième image se produira après vingt-deux battements 2/10e, etc. ; enfin, quand les dix images seront prises, l'aile aura exécuté cent dix battements et les images prises auront décomposé la révolution de l'aile en dix attitudes équidistantes, bien suffisantes pour permettre de suivre les phases du mouvement. Il ne semble pas douteux que, pendant la durée d'une seconde, les mouvements de l'aile ne conservent assez d'égalité dans leur fréquence pour se prêter à l'analyse stroboscopique.

Maurice-Girard a fait, sur diverses espèces d'insectes, des vivisections qui ont fourni d'intéressants résultats. Il a vu qu'on peut exciser une assez longue partie de la longueur des ailes sans abolir le vol; qu'on peut également sans le compromettre enlever sur certaines espèces les ailes postérieures, mais que le vol est supprimé si l'on altère les caractères essentiels de la structure de l'aile, à savoir la rigidité de sa nervure ou la flexibilité de son voile. Une incision qui divise transversalement la nervure de l'aile abolit le vol. Un vernis siccatif dont on enduit la membrane et qui lui enlève sa flexibilité l'abolit également. Ces expériences confirment la théorie que j'ai donnée sur le vol des insectes, mais elles sont moins instructives que l'emploi des méthodes délicates et plus précises dont il vient d'être question. C'est à la chronophotographie surtout qu'il faudra recourir pour étudier les nombreuses particularités des mouvements de l'aile chez les diverses espèces d'insectes, afin d'établir les rapports qui existent entre la forme des organes, les caractères de leur mouvement et le type particulier du vol dans chaque espèce.

Parmi ces types, il en est un qui doit être signalé d'une façon particulière, c'est le vol plané, c'est-à-dire le glissement de l'insecte sur l'air, sans battements d'ailes. Un grand nombre de papillons diurnes et certains névroptères pratiquent de temps en temps ce genre de vol.

Pour rendre ce phénomène intelligible et en déterminer les conditions mécaniques, il faut recourir à certaines expériences dans lesquelles on réalise autant que possible la disposition de l'insecte planeur.

On trouvera plus loin la description de ces expériences à propos du vol des oiseaux, dans lequel le planement joue un rôle très important.

LOCOMOTION AÉRIENNE. — VOL DES OISEAUX

SOMMAIRE. — Distinction des différents genres de vol. — Vol ramé et vol à voile. — Conformation de l'oiseau et de son aile. — *Vol ramé.* — Fréquence des coups d'aile; inscription des phases du mouvement de l'aile et des changements d'inclinaison de sa surface. — L'air n'agit, dans les deux phases, que sur la face inférieure de l'aile. — Phase d'abaissement, soufflerie de l'aile; influence de la vitesse de l'oiseau sur la durée de l'abaissement de l'aile; influence du vent. — Phase d'élévation, l'aile agit à la façon d'un cerf-volant; élévation de l'aile à l'essor. — Étude du vol par la chronophotographie. — Vol glissé. — Observations des fauconniers; *ressources.* — *Vol à voile.* — Nécessité du vent. — Essai de théorie: raffales, changement d'orientation. — Vol en orbes. — Vol des chauves-souris. — Poissons volants. — Vol dans l'eau.

L'observation des oiseaux montre que certaines espèces volent en agitant constamment les ailes, tandis que d'autres peuvent, avec l'aide du vent, se soutenir et se diriger dans l'air en étendant leurs ailes immobiles. Le premier type de vol s'appelle *vol ramé*, le second *vol à voile*. La conformation des oiseaux diffère suivant leur genre de vol.

L'aile de l'oiseau est l'homologue d'un bras plus ou moins parfaitement adapté à sa fonction spéciale; cette conception est déjà ancienne: on la trouve dans Pierre Belon, qui l'a exprimée d'une manière saisissante par la figure 251.

Pour devenir apte au vol, le bras de l'oiseau s'est couvert de plumes, dont les principales, pennes ou rémiges, s'imbriquent à la façon des lames d'un éventail. L'ordre de superposition de ces rémiges, la dissymétrie de leurs

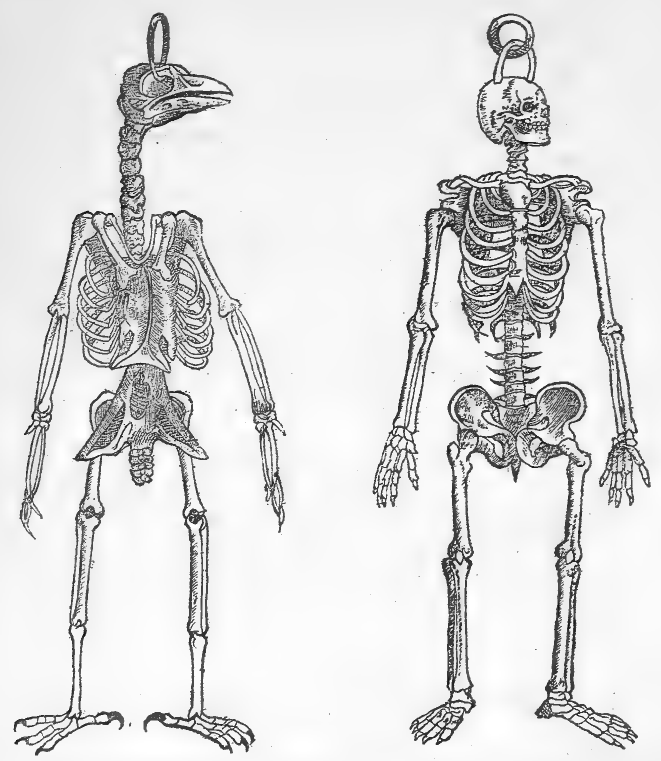


Fig. 251. — Homologie des pièces du squelette de l'oiseau et de l'homme, d'après Pierre Belon.

barbes par rapport au rachis ou nervure, font que l'aile est imperméable à l'air qui la frappe en dessous, tandis que, de haut en bas, l'air la trouve perméable, les rémiges s'écartant comme les lames d'une persienne.

La forme des rémiges diffère chez l'oiseau rameur et chez l'oiseau voilier. Chez le premier, ces plumes se rétrécissent graduellement de la base à la pointe (fig. 252); chez le second, elles se rétrécissent brusquement dans leur moitié distale (fig. 253). Cette forme des rémiges donne des aspects tout différents à l'aile rameuse (fig. 254) et à l'aile voilière (fig. 255); la seconde présente, à son extrémité, une forme déchiquetée très saisissante pour un observateur placé en dessous d'un voilier qui plane.

Le squelette d'une aile diffère de celui d'un bras par l'atrophie du carpe, par la réduction du nombre des phalanges, et par la légèreté de ses os qui sont creux; il offre, en outre, une curieuse solidarité entre les mouvements du coude et ceux du carpe, en vertu d'un mécanisme signalé par Straus-Durckheim. Cette solidarité anatomique répond à l'association constante des mouvements du coude et de la main quand l'aile s'étend ou se reploie.

Les muscles de l'aile rappellent ceux du bras humain, sauf l'atrophie de quelques-uns et le développement spécial de quelques autres. Parmi ces mus-

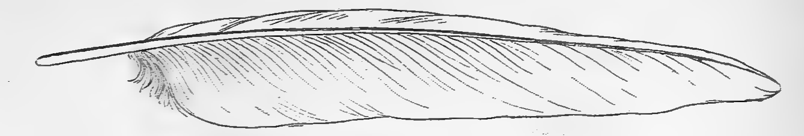


Fig. 252. — Rémige d'un oiseau rameur.

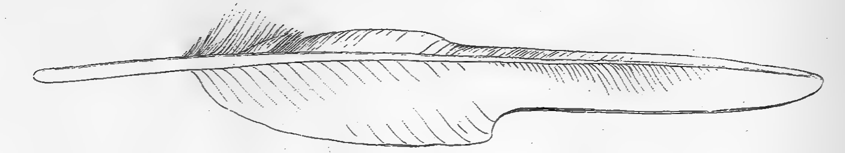


Fig. 253. — Rémige d'un oiseau voilier.

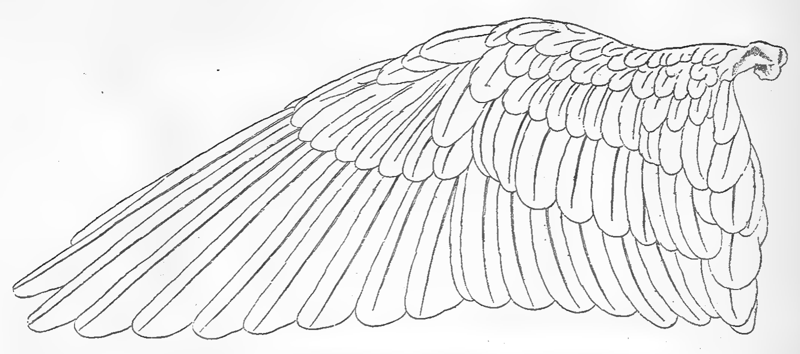


Fig. 254. — Aile rameuse d'un faucon, d'après Prechtl.

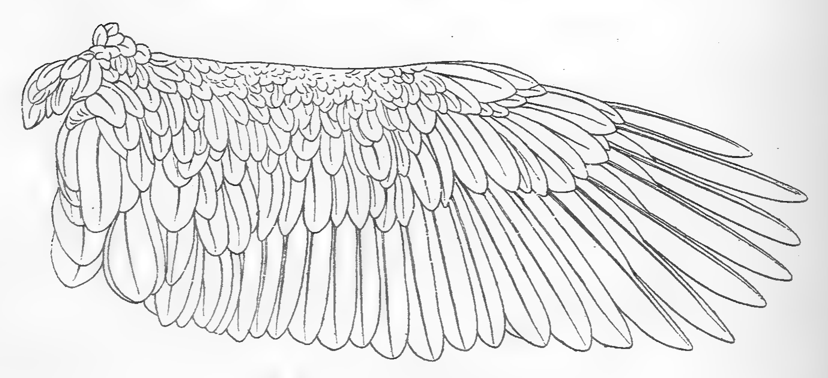


Fig. 255. — Aile voilière d'un aigle.

cles, les uns président au déploiement et au reploiement de l'aile ; on y reconnaît assez bien les homologues de ceux qui, dans le bras, commandent les

mouvements du coude et du poignet. Mais les plus importants pour le vol sont l'abaisseur et l'élévateur de l'aile. Le grand pectoral est l'abaisseur; son volume énorme indique la puissance de son travail; les grands pectoraux, à eux seuls, pèsent autant que tous les autres muscles de l'oiseau. L'élévation de l'aile est produite par le pectoral moyen, très peu développé chez les oiseaux voiliers.

Nous n'insisterons pas sur les particularités anatomiques de l'aile de l'oiseau, les ayant traitées ailleurs avec les développements nécessaires (1).

Vol ramé. — Dans ce genre de vol où l'oiseau bat constamment des ailes, l'action des plumes flexibles sur la résistance de l'air est celle que nous connaissons déjà, d'après l'aile des insectes. Le squelette osseux du bras de l'oiseau fait l'office de nervure rigide, et les pennes, en arrière, constituent un voile flexible qui s'incline sur la résistance de l'air et lui présente une surface oblique; de là résulte une composante qui chasse l'air en arrière et propulse l'oiseau en avant. Mais cet effet, comme nous l'avons vu d'après l'imbrication des rémiges, ne peut se produire que dans l'abaissement de l'aile, seul mouvement qui trouve l'aile imperméable à l'air.

Pour l'oiseau, comme pour l'insecte, il faut que l'aile ait une grande vitesse pour trouver un appui sur l'air; aussi les petites espèces d'oiseaux ont-elles des battements beaucoup plus fréquents que les grandes, comme le démontre l'observation et l'expérience.

Nous avons recouru à la méthode graphique pour déterminer le nombre des coups d'ailes chez des oiseaux de différentes tailles, et nous avons obtenu les chiffres suivants : moineau, 13; canard, 9; pigeon, 8; buzard, 5 3/4; chouette effraie, 5; buse, 3. Certains grands oiseaux : cigogne, vautour, aigle, donnent à peine un battement par seconde.



Fig. 256. — Inscription chronophotographique de la fréquence des mouvements de l'aile d'un oiseau.

Le dispositif qui nous a servi consistait à munir un oiseau d'un appareil explorateur de ses contractions musculaires, et à inscrire le nombre de ces contractions pendant le vol (fig. 256).

La même méthode, au moyen de dispositions plus compliquées (2), nous a donné les courbes des élévations et des abaissements de l'aile, et même les changements de l'inclinaison de la surface des rémiges. La figure 257 montre un pigeon muni d'une sorte de corset, suspendu dans un cadre métallique elliptique; des fils partant des os de ses avant-bras agissent sur des tambours à air qui reçoivent, l'un, n° 1, les mouvements d'élévation et d'abaissement des ailes, l'autre, n° 2, les mouvements d'avant en arrière. Cet appareil est suspendu au bras d'un manège tournant (fig. 258), et des tubes relient les deux

(1) MAREY, *Le Vol des oiseaux*. Paris, G. Masson, 1890.
(2) *Ibid.*, chap. VII.

tambours explorateurs à deux tambours inscripteurs qui tracent, sur un cylindre tournant, les deux ordres de mouvement des ailes.

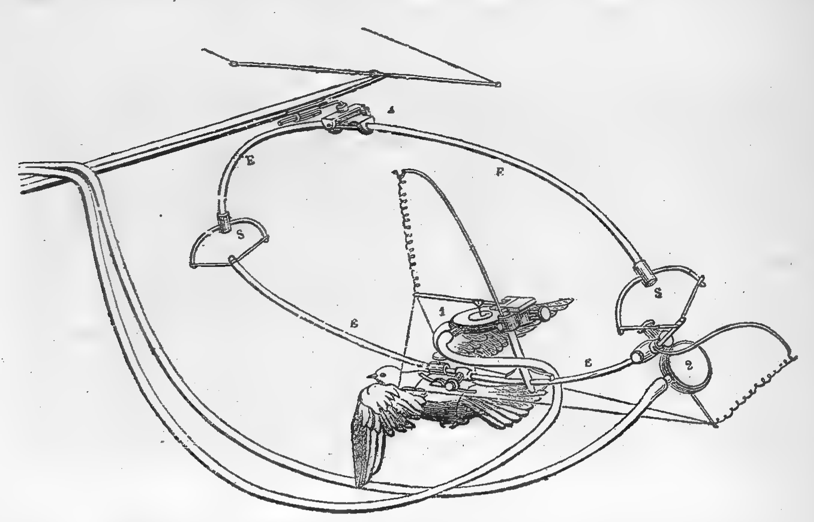


Fig. 257. — Inscription des phases du mouvement de l'aile d'un oiseau ; appareil explorateur.

De ces deux ordres de courbes représentées figure 259, on tire, au moyen d'une construction fort simple, les positions successives de l'avant-bras de l'oiseau par rapport à l'articulation de l'épaule supposée immobile. Cette tra-

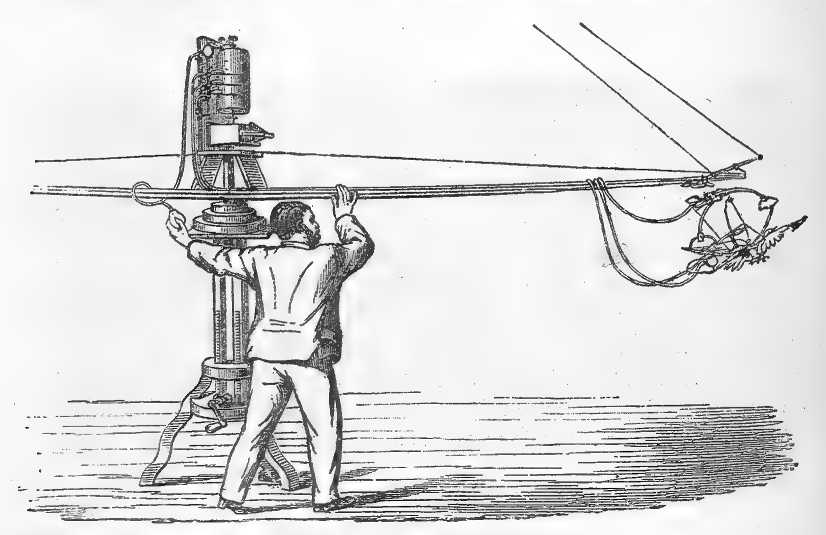


Fig. 258. — Inscription des phases du mouvement de l'aile d'un oiseau, appareil complet.

jectoire (fig. 260) montre que l'aile s'abaisse en se portant fortement en avant, et qu'elle s'élève en se portant en arrière (1).

(1) Pour le détail et l'interprétation de ces expériences, voy. *Le Vol des oiseaux*, p. 103-127.

Une expérience de même genre, mais un peu plus compliquée, nous a permis d'obtenir les différentes inclinaisons de la surface de l'aile d'une buse aux divers instants de sa trajectoire elliptique (fig. 261, A).

Et si, maintenant, nous considérons que la translation de l'oiseau se com-

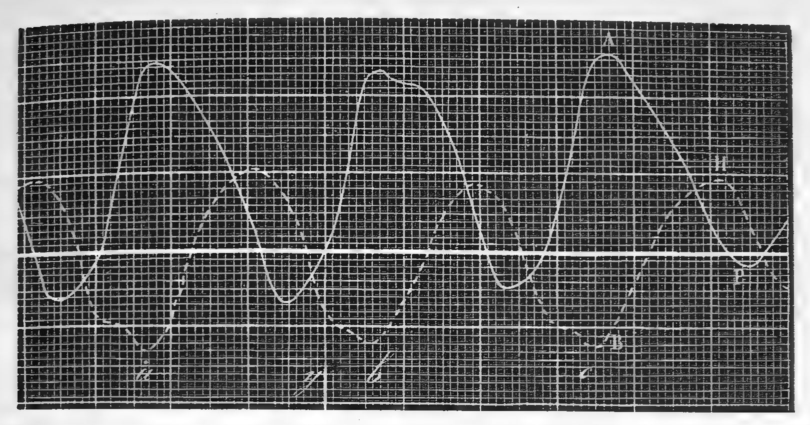


Fig. 259. — Courbe des mouvements d'élévation et d'abaissement de l'aile d'un oiseau. Inscription graphique.

bine au mouvement de son aile par rapport à l'articulation de l'épaule, nous déduirons, de la combinaison de ces deux sortes de mouvements, la trajectoire réelle de l'aile pendant le vol ; elle sera représentée en B, figure 261.

Il ressort de l'examen de cette figure que l'aile d'un oiseau animé de

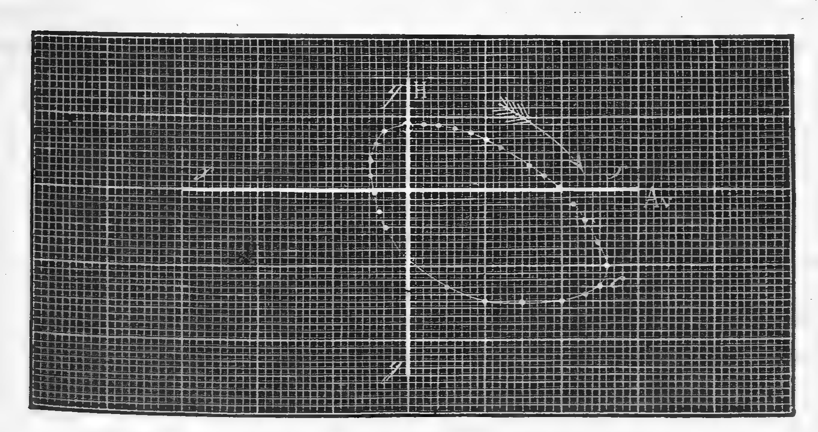


Fig. 260. — Recomposition des mouvements de l'aile d'un oiseau autour de l'articulation de l'épaule.

vitesse présente toujours sa face inférieure à la résistance de l'air ; mais cette aile agit suivant deux mécanismes différents dans ses deux phases successives d'abaissement et d'élévation. Dans la première, elle frappe obliquement l'air, comme la nageoire d'un poisson frappe l'eau ; dans la seconde, l'aile est sou-

levée par l'air, suivant le mécanisme bien connu du cerf-volant. Nous allons examiner ces deux modes d'action de l'aile.

A. — Abaissement de l'aile. — La résistance de l'air à l'aile qui s'abaisse

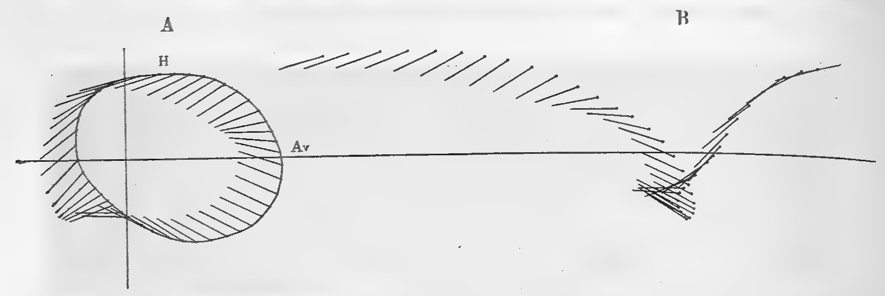


Fig. 261. — A, moitié gauche de la figure, la trajectoire et les changements d'inclinaison de l'aile d'une buse rapportés à l'articulation de l'épaule supposée fixe. — A droite, en B, trajectoire et positions réelles dans l'espace pendant un coup d'aile.

nous est déjà connue; on s'en rend compte aisément par la petite expérience décrite page 260 qui fait si bien sentir, en même temps, avec quelle énergie l'aile est poussée du côté de sa nervure. La conséquence de cet effet est que l'air est repoussé en sens contraire, et qu'une soufflerie puissante doit se produire du côté du bord libre de l'aile; cela a été démontré par des expériences.

L'observation montre que, dans le vol réel, les choses se passent de même façon. Wenham raconte que, dans les soirées calmes, il voyait souvent des pélicans disposés en longue file descendre le cours du Nil avec une vitesse qu'il estime à 50 kilomètres à l'heure. Ces oiseaux glissaient à une distance de 30 ou 40 centimètres à peine au-dessus du fleuve, sans produire la moindre agitation de la surface de l'eau. Cela prouve bien que l'air frappé ne fuit pas normalement à la surface de l'aile, mais s'échappe tangentiellement à cette surface.

Si, d'autre part, nous observons, dans les ménageries, des vautours qui s'enlèvent du sol pour se poser sur leur perchoir, ces oiseaux, dans leur vol ascendant, ont l'axe du corps vertical et agitent leurs ailes horizontalement; aussi voit-on un souffle puissant descendre sur le sol et balayer au loin les pailles, les brindilles, et même les graviers qui s'y trouvent.

L'effet de la translation de l'oiseau accroît la résistance que l'air présente à l'aile qui s'abaisse. Nous en avons donné la preuve expérimentale : un petit appareil suspendu sur un fil de fer horizontal est muni de deux ailes qu'un ressort tendu abaisse au moment voulu. Ces ailes sont maintenues relevées au moyen d'un fil qui les réunit dos à dos. A un moment donné, on brûle le fil et les ailes s'abattent; la durée de leur abaissement est de 6 dixiemes de seconde. On répète l'expérience en entraînant rapidement l'appareil le long du fil de fer; l'abaissement des ailes se produit comme tout à l'heure, mais dure, cette fois, un temps bien plus long, 54 dixièmes de seconde. Avec des translations plus rapides, on accroît encore la durée de l'abaissement (1).

(1) Marey, *Le Vol des oiseaux*, p. 256.

Ces expériences rendent compte de certains faits d'observation. Des mouettes qui prennent leur vol donnent, au moment de l'essor, c'est-à-dire quand elles n'ont pas encore pris leur vitesse, des coups d'ailes amples et fréquents; peu à peu, ces coups deviennent moins amples et plus rares. D'autre part, un oiseau attaché par un fil vole jusqu'à ce que le fil, en se tendant, arrête la vitesse de translation; à ce moment, l'oiseau, incapable de se soutenir, tombe sur le sol. On trouve dans ces faits la preuve de l'augmentation de la résistance de l'air sous l'influence de la vitesse du vol.

Pour expliquer l'accroissement de la résistance de l'air sous l'influence de la translation, on peut admettre que l'air, comme tous les fluides, résiste par son inertie aux corps qui tendent à lui imprimer un mouvement; mais, dès qu'il a reçu ce mouvement, il résiste de moins en moins. Ainsi, quand un oiseau vole sur place, il frappe une colonne d'air qui résiste d'abord, puis se dérobe sous ses ailes. Mais si l'oiseau est animé d'une vitesse horizontale, ses ailes frappent *successivement* une série de colonnes d'air différentes, et trouvent sur chacune d'elles la résistance initiale d'inertie.

Ainsi, la vitesse acquise est favorable au vol en accroissant la résistance de l'air à la surface de l'aile; c'est pourquoi l'on voit certains oiseaux courir avant l'essor pour acquérir cette vitesse; d'autres l'obtiennent en se laissant tomber d'un lieu élevé; ils glissent alors sur l'air, les ailes ouvertes, avant de donner leurs battements.

Par une réciprocité naturelle, si le vent souffle avec quelque force, l'oiseau trouve également un surcroît de résistance de l'air s'il s'envole contre le vent; c'est ce qu'on observe sur les cailles, les perdreaux et certaines autres espèces qui, par les temps calmes, sont parfois difficiles à faire lever. Certains oiseaux volent sur place sans progresser; l'alouette au printemps et l'épervier en chasse sont de ce nombre. Dans ce cas, l'oiseau a toujours le bec tourné du côté d'où vient le vent.

B. — Remontée de l'aile. — En plein vol, l'aile s'élève sans efforts; le vent relatif dû à la vitesse de l'oiseau, agissant sous sa surface oblique, la soulève puissamment. Aussi les muscles releveurs de l'aile, pectoraux moyens, sont-ils très faibles, comparés aux abaisseurs; l'oiseau doit même résister par ses muscles à l'action de l'air qui soulève son aile et, par cette résistance même, trouve un appui sur l'air qui le soutient à la façon d'un cerf-volant. Dans l'action de l'air sous la surface oblique du cerf-volant, il se produit une composante verticale qui soutient l'appareil, soit que, maintenu par sa ficelle, le cerf-volant reçoive l'action d'un vent plus ou moins fort, soit que, dans l'air calme, l'enfant qui tient la corde courre en créant sous l'appareil un vent relatif.

Mais si la remontée de l'aile, et même le soutien de l'oiseau, sont assurés pendant le plein vol, il n'en est pas de même à l'essor, tant que l'oiseau n'a pas encore acquis une vitesse suffisante; la remontée de l'aile doit alors être effectuée par l'oiseau lui-même; or, comme les muscles affectés à cette remontée sont très faibles, il faut qu'une disposition spéciale atténue notablement la résistance de l'air à l'aile remontante. Cette atténuation de la résistance de l'air est obtenue par la flexion des articulations de l'aile, et par la

séparation des pennes qui l'accompagne. Suivant une comparaison familière, les pennes s'écartent alors comme les lames d'une persienne, et laissent passer l'air dans leurs intervalles. Cette hypothèse a été vérifiée par l'emploi de la chronophotographie dont nous allons parler.

Suivant le nombre d'images qu'on prend à chaque seconde, la chronophotographie donne des figures très simples ou très compliquées. Soit un même oiseau, le goéland, qui donne cinq coups d'aile par seconde, si l'on ne prend que dix images à la seconde, on en aura exactement deux à chaque coup d'aile, de sorte que si l'oiseau est pris à ses phases extrêmes d'élévation et d'abaissement, ces attitudes se reproduisant seules sur toute la série des images seront peu instructives (fig. 262).

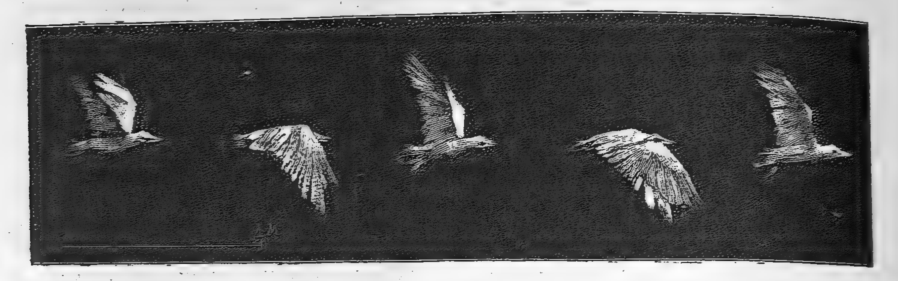


Fig. 262. — Attitudes d'élévation et d'abaissement de l'aile d'un goéland (chronophotographie).



Fig. 263. — Vol du goéland; grand nombre d'images chronophotographiques.

Si, au contraire, on multiplie beaucoup le nombre des images, soit cinquante par seconde, la figure obtenue, trop riche en documents, sera confuse (fig. 263).

Toutefois, avec un peu d'habitude, on y reconnaîtra un grand nombre de détails intéressants sur les phases du mouvement de l'aile, sur les oscilla-

tions du corps de l'oiseau et sur la trajectoire des différentes parties de l'aile.

Enfin, si le nombre des images est voisin de celui des coups d'ailes, l'oiseau sera représenté dans une série d'attitudes dont chacune sera peu différente de la voisine, et dont l'ensemble permettra de suivre *stroboscopiquement* toutes les phases du mouvement de l'aile, tout en ayant des images très nettes.

C'est ce qui est arrivé pour la figure 264, représentant le vol du canard. Cet oiseau donnait huit coups d'aile pendant qu'on prenait dix images. Il s'ensuit que chaque image de la série suivie d'avant en arrière représentera l'aile à une phase de sa révolution plus avancée de deux dixièmes que l'image précédente. Dans les phases successives de son abaissement, l'aile se porte de plus en plus en avant et en bas, tandis que l'extrémité des rémiges s'incurve sur la résistance de l'air.

Si nous analysons de la même manière la période de remontée de l'aile, en suivant toujours le mouvement de gauche à droite, nous assistons à des phases de plus en plus avancées du coup d'aile et nous voyons qu'à la cinquième image comptée de gauche à droite le coude et la main se fléchissent et les pennes se séparent les uns des autres en lames de persiennes, comme il a été dit plus haut ; enfin les deux dernières images montrent l'aile de nouveau déployée et en élévation complète. Cette manœuvre de l'essor a pour effet de diminuer la résistance de l'aile, quand l'oiseau n'a pas encore acquis de vitesse.

La figure 265 montre comment l'oiseau, au moment de l'arrêt, frappe l'air en avant pour éteindre sa vitesse et renverse son corps en arrière pour ne pas tomber en avant.

Fig. 264. — Vol du canard, attitudes successives de l'aile dans sa révolution ; la succession se lit d'avant en arrière, c'est-à-dire de gauche à droite.

Ajoutons que la chronophotographie sur plaque fixe permet de prendre l'image d'un oiseau qui vient dans la direction de l'observateur (fig. 266),

ou celle d'un oiseau qui fuit; qu'elle permet aussi, en plaçant l'appareil verticalement au-dessus de l'oiseau, d'obtenir la projection de ses attitudes sur

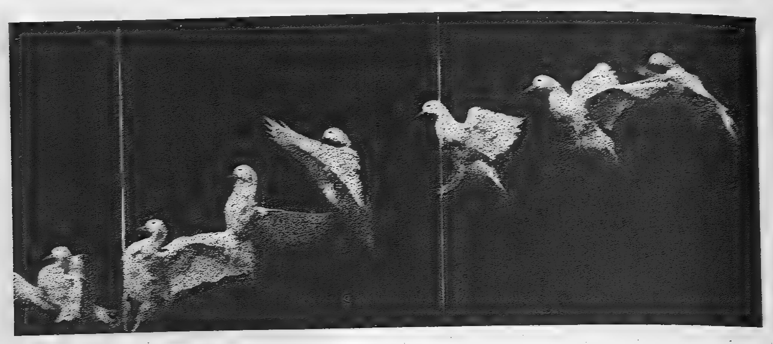


Fig. 265. — Vol du canard; battement d'arrêt au moment d'atterrissage.

un plan horizontal (fig. 267). On comprend que la combinaison de ces divers éléments permette de connaître toutes les attitudes successives de l'oiseau

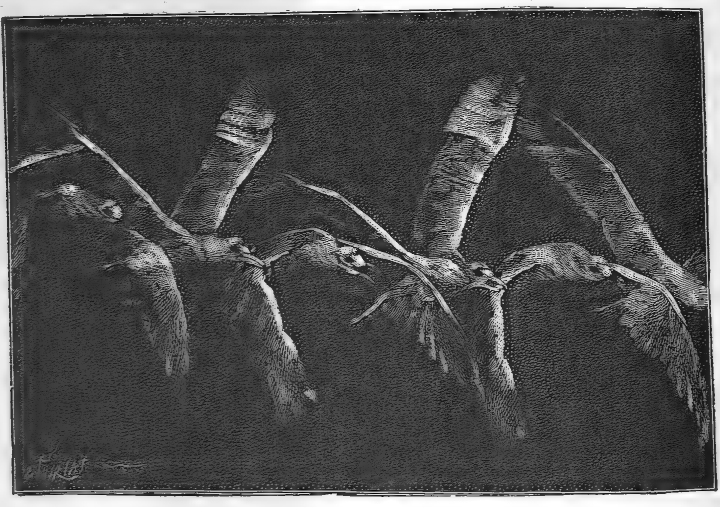


Fig. 266. — Oiseau volant dans la direction de l'observateur (chronophotographie).

aux différentes phases d'un coup d'aile, ce qui fournit les données cinématiques nécessaires à la représentation complète du mouvement.

C'est avec ces documents complexes, obtenus au moyen de séries d'images prises sous différents aspects de l'oiseau, que j'ai pu modeler des figures en relief bien plus intelligibles que toutes les images planes.

On ne peut s'étendre plus longuement ici sur l'analyse des mouvements de l'oiseau par la chronophotographie; ce sujet a été longuement développé dans un ouvrage spécial (1). Disons seulement que la chronophotographie

(1) Marey, *Le Vol des oiseaux*, fig. 103 et 104.

confirme et complète les renseignements qu'avaient donnés les autres méthodes et sur lesquelles j'ai basé la théorie du vol ramé.

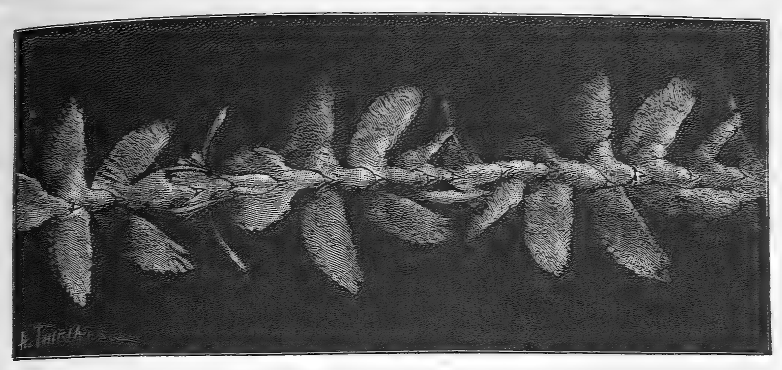


Fig. 267. — Vol d'un pigeon, chronophotographie prise d'en haut.

Vol glissé. — Quand un oiseau a acquis une grande vitesse, il n'a plus besoin de donner de coups d'ailes pour se soutenir sur l'air. L'aile orientée à la façon d'un cerf-volant que frappe inférieurement, sous un angle très faible, le vent de la vitesse, soutient suffisamment le poids de l'oiseau; et, si la trajectoire du vol est légèrement descendante (angle de 8° pour la cigogne d'après Bretonnière), ce vol glissé durera indéfiniment jusqu'à ce que l'oiseau atterrisse.

C'est à 20 mètres de vitesse par seconde environ, pour le pigeon, que l'aile est suffisamment soutenue pour n'avoir plus besoin de battre. En attelant l'oiseau au manège comme dans l'expérience représentée figure 257, si l'on imprime au manège un mouvement de rotation dans le sens du vol, on voit les coups d'ailes devenir plus rares à mesure que croît la vitesse, et s'arrêter tout à fait quand elle a atteint 20 mètres par seconde.

Le glissement sur l'air se produit chaque fois qu'un oiseau posé sur un toit veut descendre à terre; mais, arrivé à quelques mètres du sol, l'oiseau fait des battements pour éteindre sa vitesse; ces battements ont un caractère spécial; l'aile frappe directement en avant de l'axe du corps comme dans la figure 265 (1).

Les fauconniers ont bien étudié ces glissements des oiseaux de proie chasseurs; ils ont vu qu'après un glissement descendant très rapide l'oiseau n'a qu'à changer l'orientation de ses ailes pour remonter, par glissement ascendant, à une hauteur sensiblement égale à celle d'où il est tombé. C'est ce qu'en terme de vénerie on appelle la *ressource*, du latin *resurgere*. La figure 268, empruntée à Huber, est le schéma des manœuvres de l'oiseau chasseur, qui, après avoir manqué sa proie dans neuf tentatives successives, a fini par l'atteindre en P. L'ensemble d'un glissement et d'une ressource s'appelle une *passade*.

On voit parfois les buses procéder par passades successives pour progresser sans coups d'ailes contre le vent.

(1) Marey, *Le Vol des oiseaux*, fig. 151.

On peut imiter les glissements de l'oiseau dans l'air, au moyen du petit appareil représenté figure 269. Une feuille de carton mince rectangulaire est

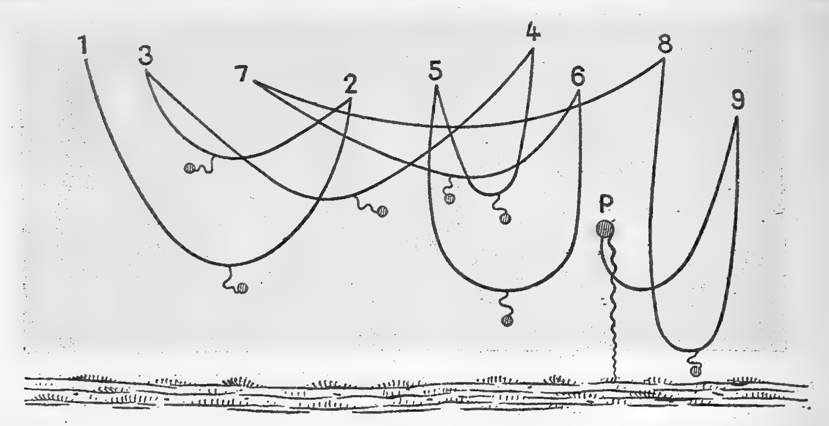


Fig. 268. — Série de passades d'un faucon qui finit par lier sa proie en P (schéma de Huber).

pliée en angle dièdre. Au fond de cet angle on colle une aiguille d'acier dont les deux extrémités débordent le carton en avant et en arrière. Aux deux bouts de l'aiguille, on ajoute deux petites boules de cire de poids égaux ; l'ap-

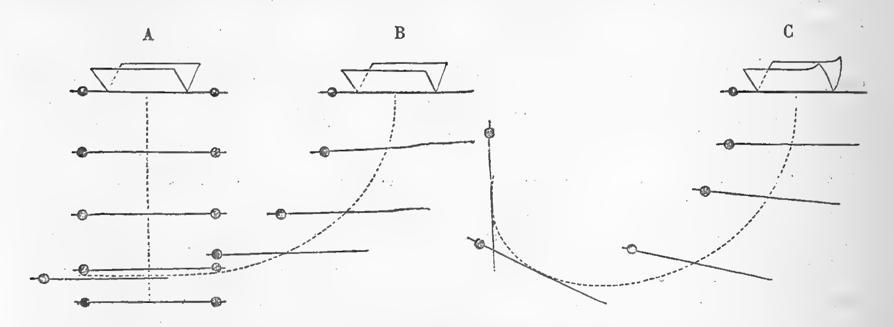


Fig. 269. — Appareil planeur tombant ou glissant dans l'air, suivant sa forme et la position de son centre de gravité.

pareil ainsi équilibré tombe verticalement, comme cela se voit en A. Le poids de l'aiguille placée à la partie la plus basse du système en assure la stabilité.

Enlevons maintenant une des boules de cire ; l'appareil en B incline en avant son extrémité la plus lourde et tombe suivant une trajectoire courbe en glissant sur l'air à la façon d'un oiseau qui, sans donner de coups d'ailes, descend d'un lieu élevé.

Si nous courbons en C les angles postérieurs du carton, en les relevant un peu, ces angles agissent à la façon d'un gouvernail quand l'appareil a pris de la vitesse ; on voit alors se produire une *ressource* analogue à celles qu'on observe sur les oiseaux chasseurs.

Du vol à voile. — On appelle ainsi le vol sans coups d'ailes, pour lequel certains oiseaux, les goélands, par exemple, évoluent autour d'un navire pendant des heures entières. Mais ce vol ne peut se produire que s'il fait un vent assez fort; en temps calme, les oiseaux voiliers volent à rames, tout au moins dans les régions inférieures de l'atmosphère où l'air est toujours moins agité que dans les régions élevées. Aussi voit-on souvent, en même temps, des oiseaux voiliers ramer au voisinage du sol, tandis que d'autres, à une plus grande hauteur, volent à voile.

Il ne viendrait pas à l'esprit d'un marin, ni d'un habitant des régions tropicales, de contester l'existence du vol à voile (1); ils en ont été maintes fois témoins. Mais pour qui ne l'a pas vu, ce genre de vol semble si difficile à comprendre que la plupart des auteurs ont trouvé plus simple d'en nier l'existence que d'en expliquer le mécanisme.

Et d'abord, on a dit que l'expression de vol à voile est inexacte, en ce que la barque à voile qui gouverne au plus près du vent a besoin d'avoir une longue quille pour l'empêcher de dériver sous le vent, et d'un gouvernail qui l'empêche de tourner sous l'action de la voile. Si l'on veut bien considérer la différence d'orientation d'une voile et d'une aile, on comprendra que si la dérivation d'une barque se fait perpendiculairement à la surface de la voile, c'est-à-dire dans le sens horizontal, cette dérivation, chez l'oiseau, pour être perpendiculaire à la surface de l'aile, devra se faire de bas en haut; il n'est pas besoin d'une quille pour empêcher cette dérivation de se produire, la pesanteur suffit, et si une action de gouvernail est nécessaire à la barque pour l'empêcher de tourner par l'action de la voile, l'oiseau trouve dans l'élévation ou l'abaissement de sa queue une véritable action de gouvernail s'exerçant dans le plan vertical.

On a cru prouver l'absurdité de la théorie du vol à voile en disant que ce serait la réalisation du mouvement perpétuel. C'est oublier que le vent représente une source de travail, au même titre qu'un cours d'eau, et que le vol à voile n'a rien de paradoxal s'il se fait en empruntant au vent une certaine quantité de travail.

Enfin, a-t-on dit : admettant que le vent puisse, quand un oiseau est immobile, créer sous son aile une composante qui le soutienne et même le soulève malgré la pesanteur, ce phénomène est inséparable d'un certain entraînement de l'oiseau, entraînement qui s'accélérera et donnera à l'oiseau la vitesse du vent lui-même; à ce moment, aucune force ne s'exercera plus sous l'aile et l'oiseau tombera.

Cette objection, beaucoup plus sérieuse que les précédentes, implique du moins que le vol est possible si le vent, au lieu d'être un courant d'air continu, procède par rafales et si des périodes de calme succèdent aux coups de vent. Or, tout le monde a observé que le vent n'est pas continu; les modulations lamentables qu'il produit en s'engouffrant dans nos cheminées en sont la preuve. Voyons donc comment on peut expliquer le vol à voile dans l'hypothèse d'un vent intermittent.

(1) Voir à cet égard les observations et les calculs de Basté, *L'Aéronaute*, oct. 1892, p. 91, et Marey, *Le Vol des oiseaux*, chap. xx.

Et d'abord, il faut rappeler que les composantes d'un vent horizontal sous l'aile d'un oiseau varient avec l'inclinaison de l'aile par rapport au vent, que la force soulevante et la force entraînante varient en sens inverse l'une de l'autre, de sorte que, pour un angle très petit de l'aile avec la direction du vent, la force soulevante est incomparablement plus grande que la force entraînante (1).

Soit donc (fig. 270), en *a* un oiseau supposé immobile avec des ailes très

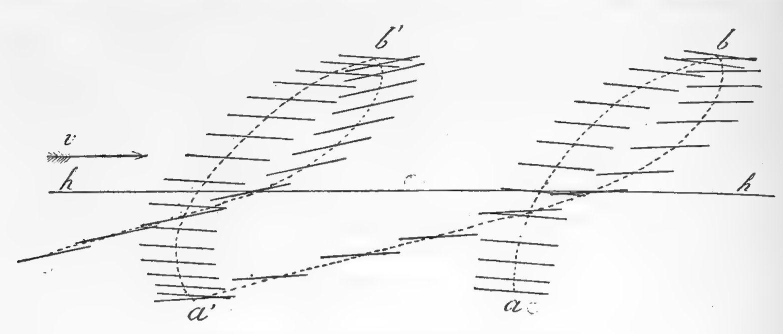


Fig. 270. — Manœuvres du vol à voile.

peu inclinées sur la direction du vent : il sera soumis à deux forces, l'une soulevante très grande qui le fera s'élever, l'autre horizontale, très faible, qui l'entraînera également d'un mouvement accéléré. La trajectoire de l'oiseau l'aura porté en *b* d'un mouvement ascendant, accéléré d'abord, puis diminué, et d'un mouvement d'entraînement croissant.

Supposons que le vent cesse quand l'oiseau sera au point *b* ; celui-ci pourra, en changeant l'inclinaison de ses ailes, se laisser glisser sur l'air, ce qui le portera au point *a'* en avant du point *a* et sensiblement au même niveau. Qu'à ce moment une nouvelle rafale vienne à souffler : l'oiseau, en vertu de sa force vive, pourra s'élever sur le vent plus haut même que tout à l'heure, quand il n'avait en *a* que son inertie à opposer à la force entraînante du vent. Arrivé en *b'*, nouvelle accalmie et nouveau glissement de l'oiseau.

Si le vol à voile contre le vent peut se concevoir dans un courant d'air intermittent, on peut supposer que dans un vent continu certaines manœuvres de l'oiseau remplacent les rafales et que, suivant l'orientation de ses ailes, l'oiseau *accepte ou refuse*, pour ainsi dire, l'action du vent. Ces manœuvres, le vol en orbe nous en donne encore un exemple.

Admettons que l'oiseau ait subi de l'action du vent une certaine vitesse d'entraînement. Cette vitesse, il peut, par un mouvement tournant, la diriger contre le vent lui-même et, par une orientation convenable de ses ailes, en tirer une force ascendante qui le porte à un niveau élevé. C'est ainsi que dans les ressources décrites par les fauconniers (fig. 268) l'oiseau utilise, en air calme, la force vive acquise dans sa chute, pour remonter sensiblement à la hauteur d'où il s'est laissé choir. Ne peut-on pas admettre que, dans un plan

(1) Marey, *Le Vol des oiseaux*, chap. xiv.

horizontal, il se passe quelque chose d'analogue à ce qui, dans la chasse des faucons, s'observe dans un plan vertical. Tel est le problème qui se pose. En tout cas, il ne s'agit plus de nier l'existence d'un fait réel, au nom d'une théorie basée sur la résistance de l'air que l'on connaît encore fort mal, mais on doit partir des faits incontestables pour trouver, s'il est possible, une théorie qui les explique (1).

La difficulté principale de ce genre d'études tient à ce que les différents actes du vol à voile échappent aux moyens puissants d'analyse dont on dispose pour l'étude du vol ramé, c'est-à-dire de la méthode graphique et de la chronophotographie. J'ai toutefois proposé une méthode qui permettra de déterminer la vitesse et la hauteur de l'oiseau aux différentes phases de sa trajectoire en orbe (2).

La même insuffisance de renseignements empêche de traiter ici du vol des chéiroptères ou des glissements sur l'air qui permettent aux polatouches de franchir en sautant de longs intervalles, aux poissons volants de s'élancer hors de la mer pour glisser sur l'air en décrivant une longue trajectoire.

(1) Voy. *Le Vol des oiseaux*, chap. xx.
(2) *Ibid.*, p. 322.

PRINCIPES GÉNÉRAUX
D'HYDROSTATIQUE ET D'HYDRODYNAMIQUE

Par M. WEISS

HYDROSTATIQUE

Fluides. — Les fluides se distinguent des solides en ce que leurs molécules n'occupent pas les unes par rapport aux autres une position fixe. Ces fluides sont les gaz et les liquides.

Les molécules des fluides étant parfaitement mobiles les unes par rapport aux autres, ces corps se moulent exactement sur la surface interne des vases qui les contiennent. Lorsqu'on place un gaz à l'intérieur d'un vase, il en occupe toujours toute la capacité ; ses molécules s'écartent les unes des autres en conséquence. Un liquide, au contraire, conserve un volume constant quel que soit le vase qui le contienne. Sa forme changera avec celle du récipient, mais ses molécules, tout en glissant les unes sur les autres, conserveront la même distance réciproque.

Pression. — Considérons un vase complètement rempli d'un fluide quelconque, que nous supposerons d'abord dénué de pesanteur. Ce fluide exerce sur les parois du vase une certaine pression, et si l'on venait à découper dans la paroi de ce vase une ouverture, le fluide s'échapperait par cette ouverture, à moins que la pression extérieure ne soit plus grande que la pression intérieure, auquel cas c'est l'inverse qui se passerait. Cette pression du fluide ne s'exerce pas seulement sur la paroi du vase ; en un point quelconque du milieu, une petite surface idéale, ou, si on veut la matérialiser, la surface d'un petit morceau de papier tel que AD, subira une pression de la part du fluide.

La propriété fondamentale des fluides, énoncée par Pascal, est que la pression se transmet intégralement. Cela veut dire que si en un point quelconque du fluide une surface donnée supporte une pression déterminée, en tout autre point la même surface supportera la même pression. Par exemple, le vase A contient un fluide non pesant. En B, 1 centimètre carré subira de la part du fluide une pression de 1 kilogramme. On peut affirmer que en C 1 centimètre carré supportera aussi une pression de 1 kilogramme. De même si, au lieu de prendre une surface de paroi, on prenait 1 centimètre carré en D, il supporterait encore cette même pression de

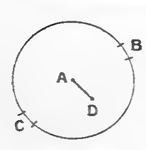


Fig. 271.

1 kilogramme. D'une façon générale, dans ce vase, 1 centimètre carré, quelles que soient sa position et son orientation, supporte une pression de 1 kilogramme.

Cette pression est normale à la surface.

Ce principe établi pour les fluides non pesants subsiste pour les fluides pesants, mais il s'y ajoute un autre effet.

Considérons un vase V contenant un fluide pesant le remplissant complètement.

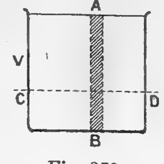


Fig. 272.

Un centimètre carré de paroi A, à la partie supérieure du vase, sera soumis à la pression p qui se transmettra intégralement au centimètre carré placé en B. Mais, en plus, B supportera le poids de la colonne de fluide qui se trouve au-dessus de lui.

Par conséquent, B supportera une pression d'autant plus grande que AB sera lui-même plus grand.

Dans ce cas, la pression est encore normale à la surface.

Les petites surfaces A et B n'ont pas besoin d'être superposées pour que cette règle s'applique. En effet, toutes les petites surfaces égales à 1 centimètre, et se trouvant dans un même plan horizontal CD, supportent la même pression que 1 centimètre en A, plus le poids d'une colonne de fluide ayant pour base 1 centimètre carré, et pour hauteur la distance verticale entre C et A. Enfin, la pression sur 1 centimètre carré est indépendante de l'orientation de ce centimètre. Ainsi, 1 centimètre carré placé en C supporte la même pression, qu'il soit horizontal, vertical ou oblique. Une surface telle que CD, où chaque centimètre supporte la même pression, s'appelle une surface de niveau.

Principe d'Archimède. — Lorsqu'un corps C se trouve plongé dans un fluide, toute sa surface se trouve soumise à une certaine pression. Si le fluide est pesant, la pression sur chaque centimètre carré sera plus grande à la partie inférieure du corps qu'à la partie supérieure. Il en résultera que toutes les pressions qui tendront à élever le corps seront supérieures à celles qui tendront à l'abaisser. La résultante de l'ensemble de toutes ces pressions sera dirigée de bas en haut.

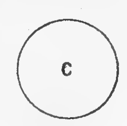


Fig. 273.

On démontre expérimentalement et théoriquement que cette résultante ou poussée du fluide sur le corps est égale au poids du fluide déplacé par le corps.

Il peut arriver :

1° Ou bien que le corps ait exactement le même poids que le volume de fluide qu'il déplace. Le corps restera alors en équilibre dans ce fluide, il ne montera ni ne descendra.

2° Ou bien que le corps ait un poids supérieur à celui du volume de fluide déplacé, et il tombera comme le font la plupart des corps dans l'air.

3° Ou bien, enfin, que le corps ait un poids inférieur à celui du volume du fluide déplacé, la poussée sera supérieure à l'effet de l'attraction terrestre. Le corps s'élèvera comme un ballon dans l'air ou comme beaucoup de corps dans l'eau.

Ce principe d'Archimède trouve son application dans un grand nombre de cas. En particulier lorsqu'on veut déterminer le volume d'un corps, il suffit de le suspendre sous le plateau d'une balance, et de faire l'équilibre. On plonge ensuite le corps dans l'eau ; il en résulte une poussée de bas en haut. On rétablit l'équilibre en ajoutant des poids dans le plateau. Ces poids ajoutés donnent le poids d'eau déplacée par le corps et par suite son volume.

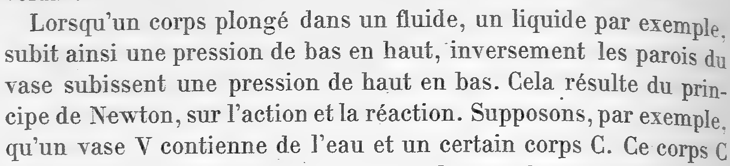


Fig. 274.

Lorsqu'un corps plongé dans un fluide, un liquide par exemple, subit ainsi une pression de bas en haut, inversement les parois du vase subissent une pression de haut en bas. Cela résulte du principe de Newton, sur l'action et la réaction. Supposons, par exemple, qu'un vase V contienne de l'eau et un certain corps C. Ce corps C subit, comme nous l'avons dit, une poussée de bas en haut. Inversement les parois du vase subissent une poussée de haut en bas, égale au poids de l'eau contenue dans le vase, plus le poids d'eau qui occuperait le volume du corps.

Lorsqu'un corps C repose sur un plan, par exemple sur le fond d'un vase V, tout le poids du corps se transmet au plan par leur point de contact. Il peut arriver alors que sous cette pression le corps C se déforme et se détériore en ce point de contact. Si l'on remplit le vase d'eau par exemple, le corps subira une poussée de bas en haut et la pression qu'il exerce en son contact avec le plan sera diminuée d'autant; si sa densité n'est que très peu supérieure à celle du liquide dans lequel il est plongé, il ne subira plus aucune pression directe en un de ses points par contact avec le vase qui le contient, la pression du liquide sera répartie sur toute sa surface et ne causera aucune déformation sensible. C'est ainsi que certains organes délicats, comme le cerveau, sont soutenus et protégés dans la boîte osseuse qui les contient.

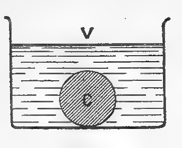


Fig. 275.

HYDRODYNAMIQUE

Considérons un liquide en mouvement.

La variation de pression d'un point à un autre ne suit plus la loi simple indiquée pour les liquides en équilibre.

De plus, la pression exercée par le liquide sur une paroi solide n'est plus normale à la paroi. Ceci n'aurait lieu que si les molécules liquides glissaient sur ces parois sans aucun frottement. En réalité, il n'en est pas ainsi. Lorsqu'un liquide se déplace sur une paroi solide, il y a entre ces deux corps un frottement analogue à celui que nous avons étudié dans le mouvement de deux corps solides au contact. En nous reportant au frottement des solides, nous pouvons aisément concevoir que l'action exercée par le liquide mobile sur la paroi fixe n'est plus normale à cette paroi. La pression du liquide sur la paroi a une inclinaison variable suivant la grandeur du frottement. Elle dépend de la vitesse du courant, de la nature du liquide et de la paroi.

Un autre élément influe encore considérablement sur la transmission des pressions dans un liquide en mouvement : c'est ce que l'on appelle la viscosité du liquide. Nous avons en effet supposé dans la définition des fluides que leurs molécules roulent les unes sur les autres sans éprouver aucune résistance. Mais cette définition correspond à un état idéal, à ce que l'on peut appeler un fluide parfait. Les liquides que nous connaissons sont loin de se trouver dans ce cas. Ils possèdent tous ce que l'on appelle un frottement intérieur.

Lorsque les molécules d'un pareil liquide sont en mouvement les unes par rapport aux autres, elles éprouvent dans leurs déplacements une résistance due au frottement contre les molécules voisines. Cette résistance est cause d'une perturbation dans la transmission des pressions.

Dans un liquide en mouvement, on conçoit que les molécules aient une tendance à se mouvoir des points où la pression est grande vers les points où elle est plus petite.

La différence de pression entre deux points d'un liquide, cause du mouvement de ce liquide, est ce que l'on appelle la charge. Considérons un tuyau d'écoulement d'eau. A l'une de ses extrémités la pression sera par exemple de trois atmosphères, à l'autre extrémité elle sera de une atmosphère si le tuyau débouche dans l'air. On dira que la charge entre les deux extrémités du tuyau est de deux atmosphères. C'est sous l'influence de cette charge que se produira l'écoulement.

Si dans un liquide au repos ou en mouvement on plonge un tube vertical, le liquide monte dans ce tube vertical à une hauteur proportionnelle à la pression du liquide à l'orifice inférieur du tube. Cette hauteur est ce que l'on appelle la hauteur piézométrique. Par exemple, perçons un trou dans la paroi d'un tuyau d'écoulement d'eau et fixons solidement dans ce trou un tube vertical en verre ; l'eau montera dans ce tube à une hauteur indiquant la pression à l'orifice inférieur du tube de verre. La hauteur de l'eau dans ce tube donne la hauteur piézométrique. En répétant la même opération en divers points du tuyau, on a une série de hauteurs ou de niveaux piézométriques indiquant la répartition de la pression dans ce tuyau. La différence entre les hauteurs piézométriques entre deux points donne la charge entre ces deux points. C'est cette charge, avons-nous dit, qui produit le mouvement, mais il y a un autre élément à introduire. Quand nous cherchons à déplacer un corps solide sur un autre, nous avons à vaincre une certaine force due au frottement. Le mouvement que prend le corps mobile dépend de la différence entre la force motrice et la résistance de frottement. De même, lorsqu'un liquide se déplace sous l'influence de la charge, nous savons qu'il faut vaincre certaines résistances. Les unes sont dues au frottement du liquide contre les parois, les autres au frottement intérieur du liquide. Ces résistances qu'il faut retrancher de la charge portent le nom de perte de charge.

Ainsi, lorsqu'un liquide se déplace sous l'influence d'une certaine charge, tout se passe comme si cette charge subissait une certaine diminution, dite perte de charge, causée par les divers frottements du liquide.

On démontre, en mécanique, que la variation de vitesse d'une masse liquide est liée à la charge et à la perte de charge par la formule

$$V^2 - V_0^2 = 2g(h - \zeta).$$

où h représente la charge et ζ la perte de charge, g est l'accélération terrestre.

Écoulement des liquides à travers un orifice en mince paroi. — Nous allons d'abord étudier un cas simple, c'est celui où le liquide contenu dans un réservoir s'écoule à travers un orifice percé dans une paroi très mince. Ce cas est simple, parce que la perte de charge y est nulle et qu'il est facile de suivre la répartition des pressions et la charge. Considérons un vase plein d'eau jusqu'à un niveau AB, à une hauteur h au-dessus de l'orifice O percé à travers la paroi très mince du réservoir. Dans toute l'étendue du réservoir jusqu'au voisinage de O, les mouvements du liquide sont extrêmement minimes, par conséquent tout frottement est négligeable. La pression varie dans ce réservoir comme s'il n'y avait aucun écoulement, par conséquent la hauteur piézométrique à gauche de l'orifice est h plus la pression atmosphérique. Lorsque le liquide a passé l'orifice, il se trouve libre dans l'air; il est donc à la pression de l'atmosphère. Donc la charge entre les deux côtés de l'orifice est égale à h.

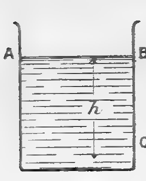


Fig. 276.

La perte de charge est négligeable, car elle ne se produit que pendant le passage à travers l'orifice qui est très mince.

Donc la vitesse d'écoulement du liquide est donnée par :

$$V^2 = 2gh, \qquad \text{ou} \qquad V = \sqrt{2gh}.$$

Chaque molécule a la même vitesse que si elle tombait en chute libre de la hauteur h, c'est-à-dire de la surface libre du liquide (Voy. *Mécanique*).

Connaissant la vitesse d'écoulement du liquide, il semble très aisé de calculer le débit du bassin, puisque l'on peut déterminer la section de l'orifice d'écoulement.

En réalité, il se produit à cet orifice d'écoulement une série de phénomènes sur lesquels il nous faut attirer l'attention.

L'expérience prouve que lorsqu'un liquide s'écoule à travers un orifice en mince paroi, la veine liquide subit immédiatement après sa sortie un rétrécissement.

Fig. 277.

Tout se passe au point de vue du débit comme si l'orifice avait un calibre inférieur à celui qu'il a réellement. L'on ne *connaît pas actuellement* les moyens de calculer la valeur de ce rétrécissement. Toutefois, l'expérience a fait voir que l'on ne commettait pas d'erreur appréciable en admettant que la section rétrécie était égale à la surface de l'orifice multipliée par 0,62, dans le cas d'un orifice circulaire.

Ce coefficient n'a été vérifié que pour des valeurs de h inférieures à 6^m,80 et des diamètres d'orifice compris entre 0^m,02 et 0^m,16.

Par conséquent, si un vase contient un liquide à une hauteur h au-dessus de l'orifice en mince paroi, et si A est la surface de cet orifice, on a :

Pour la vitesse d'écoulement

$$V = \sqrt{2gh},$$

et pour la quantité de liquide écoulé par seconde

$$Q = 0{,}62 \times A \times \sqrt{2gh}.$$

Signalons encore un autre phénomène curieux qui se passe à la sortie du liquide. Il est connu sous le nom d'inversion de la veine ; voici en quoi il consiste :

Soit un orifice en mince paroi et ayant par exemple la forme d'un carré à côtés horizontaux et verticaux, immédiatement à sa sortie la veine liquide aura cette même forme. Mais rapidement sa section changera et à une certaine distance elle prendra la figure d'un carré à diagonales horizontale et verticale. Puis, plus loin, elle reviendra à sa forme première et ainsi de suite. De même, un liquide passant par une fente verticale donnera une veine dont la hauteur ira en diminuant pour arriver à un rectangle horizontal, puis de nouveau un rectangle vertical et ainsi de suite. La cause de ce phénomène est inconnue, il se produit avec un orifice de forme quelconque.





Fig. 278.

Tuyaux cylindriques. — Lorsqu'un liquide s'écoule dans un tuyau cylindrique, les frottements et par suite la perte de charge prennent une grande importance. Nous n'examinerons ici que le cas du régime permanent.

Il y a d'abord lieu de considérer le frottement du liquide contre la paroi du tube. La résistance qui en résulte dépend naturellement de la nature du liquide, mais aussi de la nature de la paroi. En effet, si l'on produit l'écoulement d'un même liquide, l'eau par exemple, à travers des tubes de même diamètre et de même longueur, mais de nature différente, on constate que pour une même charge, la quantité d'eau débitée varie. De même on a observé que dans les conduites d'eau, toutes choses égales d'ailleurs, les tuyaux neufs et lisses intérieurement donnaient un débit plus grand qu'après un dépôt, même très léger, de matières calcaires.

Il résulte de ce frottement entre la paroi du tuyau et la couche de liquide immédiatement en contact avec elle, que cette couche liquide est retardée dans son mouvement.

Mais de même entre cette première couche annulaire et une deuxième couche immédiatement voisine, il y a une résistance due au frottement réciproque des molécules liquides entre elles et ainsi de suite. On peut se représente- le liquide coulant en régime permanent, dans un tuyau cylindrique, comme réparti en une série de couches annulaires, comparables aux divers tubes d'un télescope rentrant les uns dans les autres. L'ensemble du liquide est retardé dans son mouvement par son frottement contre la paroi. La première couche contiguë à cette paroi a la moindre vitesse, la vitesse du liquide va en

augmentant de la périphérie à l'axe du tuyau, chaque couche étant entraînée par les couches centrales et retardée dans sa progression par celle qui l'entoure immédiatement.

Dans la plupart des cas, il est impossible de déterminer les vitesses des différentes couches que nous venons de considérer, mais il suffit de connaître la vitesse moyenne du liquide, c'est-à-dire la vitesse qu'il faudrait supposer appartenir uniformément à toutes les couches pour obtenir le même débit. Le débit du tuyau par seconde s'obtient alors en multipliant la surface de section par la vitesse. Remarquons que dans un tuyau cylindrique la vitesse moyenne doit être la même dans toute la longueur du tuyau. L'eau ou les liquides en général peuvent être considérés comme incompressibles; par conséquent, en isolant par la pensée une portion AB d'un tuyau, s'il entre par AA′ un certain volume de liquide il doit en sortir le même volume par BB′, ce qui revient à dire que la vitesse à travers AA′ est la même qu'à travers BB′. Si on avait un tuyau de section variable telle que AB, le débit devrait encore être le même à travers AA′ et à travers BB′. Il en résulterait évidemment que les vitesses seraient différentes en A et en B, leurs valeurs étant inversement proportionnelles aux surfaces AA′ et BB′. A tout rétrécissement correspondrait un courant rapide, à tout élargissement un courant lent.

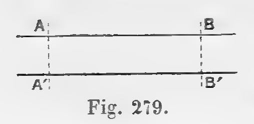


Fig. 279.

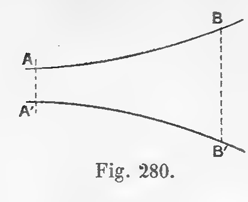


Fig. 280.

Considérons un tuyau cylindrique AB, sur toute la longueur de ce tuyau la vitesse à une distance donnée de la paroi conserve la même valeur. Il résulte de la formule $V^2 - V_0^2 = 2g(h)$ que le terme h représentant la différence entre la charge et la perte de charge doit être nul dans toute la longueur du tuyau. Or, si le tuyau est d'une substance uniforme, la perte de charge due au frottement doit être proportionnelle au chemin parcouru dans le tuyau. Par suite, si l'on suit le tuyau, la charge doit varier régulièrement, c'est-à-dire que, suivant le sens dans lequel on marche, les niveaux piézométriques vont en s'élevant ou en s'abaissant régulièrement. C'est ce que l'expérience vérifie. Perçons dans la paroi d'un tuyau cylindrique une série de trous et fixons-y solidement des tubes en verre *a*, *b*, *c*, *d*, etc., le liquide montera dans ces tubes piézométriques et indiquera la pression au point correspondant du tuyau. Or, comme l'indique la figure, les niveaux piézométriques se distribueront régulièrement sur une droite inclinée. Mais si, comme dans le cas de la figure, le tuyau, tout en gardant une section uniforme, avait des parois de nature différente, il n'en serait plus de même.

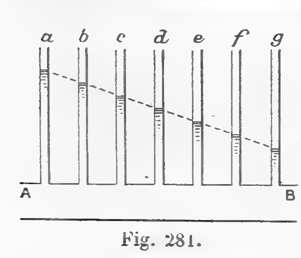


Fig. 281.

Supposons par exemple que de A en B les parois soient lisses, ne donnant lieu qu'à un frottement faible, et qu'elles soient plus rugueuses de B en C. On aurait encore la même vitesse dans toute la longueur du tuyau et par suite h-g serait encore toujours nul. C'est-à-dire que sur un parcours quel-

conque la charge serait encore égale à la perte de charge due aux résistances passives. Mais de A en B, la perte de charge étant plus faible que de B en C, la chute des niveaux piézométriques serait aussi moins rapide de A en B que de B en C. En faisant passer une ligne par ces divers niveaux, on aurait deux droites se coupant au point de rencontre B des deux tuyaux, la plus inclinée correspondant à la plus grande perte de charge. On voit que d'une façon générale, en ayant une série de tuyaux de nature différente les uns au bout des autres, l'inclinaison de la droite passant par les niveaux piézométriques renseigne sur les frottements rencontrés par le liquide sur son parcours. On peut ainsi étudier expérimentalement ces frottements.

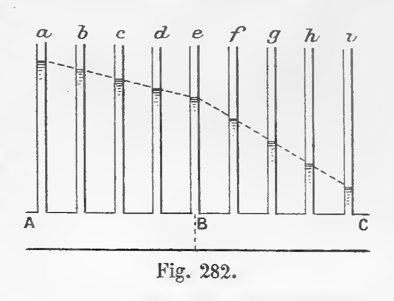


Fig. 282.

Lorsque le tuyau d'écoulement n'est plus rectiligne, mais présente des coudes, en chacun de ces coudes il se produit une perte de charge spéciale. Tout se passe comme si en ce coude il y avait un accroissement de frottement contre les parois du tuyau. Il en résulte évidemment une chute des niveaux piézométriques en ce point. Supposons par exemple qu'un tuyau ABC de structure uniforme présente une courbure brusque en B. En construisant la ligne des niveaux piézométriques, on verrait qu'elle descend régulièrement à droite et à gauche de B avec la même inclinaison, mais qu'aux environs du point B il y a eu une chute brusque.

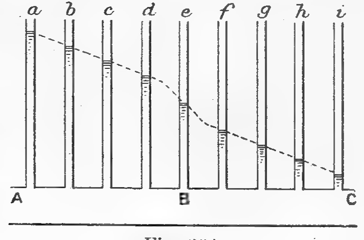


Fig. 283.

Lorsque l'on prend deux tuyaux de diamètre différent dans lesquels un liquide s'écoule sous une même charge, on constate que le débit n'est pas proportionnel à la section du tuyau. Par exemple, prenons deux tuyaux de même longueur ayant le premier 1 centimètre carré de section, le second 1 décimètre carré de section : le deuxième ne fera pas couler 100 fois plus d'eau que le premier sous la même pression. On peut dire encore qu'un tuyau de 100 centimètres carrés de section ne fait pas couler la même quantité d'eau que 100 tuyaux de 1 centimètre carré. Cela ne peut tenir qu'à une différence dans les frottements que l'eau rencontre dans les deux espèces de tuyaux. L'expérience prouve que les frottements sont plus considérables dans les petits tuyaux que dans les gros, le gros tuyau fait couler plus d'eau que les 100 petits.

Que se passe-t-il quand on considère des tuyaux de diamètre différent placés bout à bout. Prenons deux tuyaux AB et BC, le second plus gros que le premier. La vitesse du liquide sera plus grande en AB qu'en BC. Nous savons que la résistance due aux frottements est plus grande aussi dans le petit que dans le gros tuyau. Cela a déjà lieu à vitesse égale, *à fortiori* ici où la vitesse

est plus grande en AB qu'en BC. Par conséquent, la perte de charge sera plus grande dans le trajet AB que dans le trajet BC, la ligne des niveaux piézométriques sera plus inclinée en AB qu'en BC, comme le représente la figure. L'expérience vérifie pleinement ce résultat : quand on a une série de tuyaux de diamètres variables les uns au bout des autres, les pressions tombent d'autant plus rapidement que les tuyaux ont un plus faible calibre.

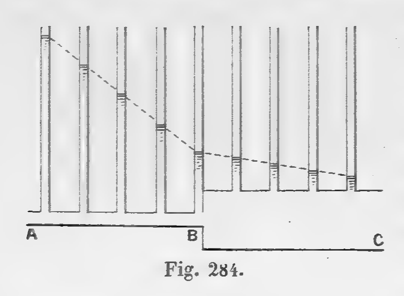


Fig. 284.

Mais il y a encore au point B un phénomène spécial. Chaque fois qu'un tuyau débouche dans une cavité de plus grand diamètre, il se produit un tourbillonnement du liquide donnant lieu à une perte de charge spéciale. Tout se passe comme si, indépendamment des résistances de frottement que nous connaissons, il y avait aux environs de B une résistance spéciale. Cette résistance donne lieu à une perte de charge qui se traduit par une chute des niveaux piézométriques, de telle sorte que tous les niveaux à droite de B ont une hauteur moindre que celle qu'ils devraient avoir. Le tourbillon qui se produit en B est facile à mettre en évidence, car si l'on place en cet endroit un tube piézométrique, il se produit une véritable aspiration qui fait tomber le niveau au-dessous de celui des tubes suivants.

Finalement, au lieu d'obtenir la ligne *abc* à laquelle on est conduit par la seule considération des frottements de la paroi et des molécules liquides, on a la ligne *abb'c'*, que donne l'expérience.

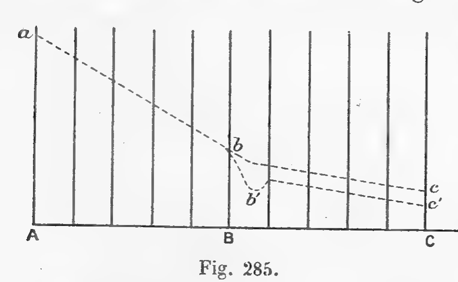


Fig. 285.

Pour connaître la quantité de liquide qui s'écoule par une conduite, il faut pouvoir déterminer la vitesse moyenne du liquide dans une section.

D'après ce que nous avons dit, la charge par mètre courant est égale à la perte de charge. Or, cette perte de charge est liée à la vitesse du courant liquide. Par conséquent il existe, pour un tuyau déterminé, une relation entre la vitesse du liquide et la charge par mètre courant. Cette relation n'est pas connue d'une façon générale, l'expérience seule permet de la déterminer. Pour l'eau, la formule empirique

$$\text{(1)} \qquad P = \frac{D}{4}(aV + bV^2),$$

où D représente le diamètre du tuyau, relie assez exactement la valeur de la pression P par mètre courant à la vitesse V ; *a* et *b* sont des coefficients à déterminer par l'expérience. Une fois que l'on connaît ces coefficients, on peut, en

mesurant P, calculer V pour une valeur déterminée de D. La valeur de V connue, la dépense par seconde est donnée par la formule

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} \cdot V.$$

La formule (1) exige dans chaque cas la résolution d'une équation complète du 2e degré. Une autre formule, due à M. Darcy, donne en général une approximation très suffisante :

$$DP = \left(\alpha + \frac{\beta}{D}\right) V^2$$

qui donne

$$V = D \sqrt{\frac{P}{\alpha D + \beta}}.$$

et pour la quantité d'eau débitée :

$$Q = \frac{\pi D^3}{4} \sqrt{\frac{P}{\alpha D + \beta}}.$$

On détermine α et β par deux expériences.

Cette formule fait voir que dans une conduite de diamètre déterminé la quantité d'eau débitée est proportionnelle à la racine carrée de la pression. C'est-à-dire qu'il faut, toutes choses égales d'ailleurs, une pression quatre fois plus grande pour avoir un débit double, neuf fois plus grande pour avoir un débit triple.

Écoulement dans les conduits capillaires. — Ce que nous avons dit précédemment ne s'applique qu'aux tuyaux à grand diamètre; la loi d'écoulement des liquides dans les conduits capillaires est totalement différente de la précédente. Nous devons à Poiseuille une étude très complète de cette question.

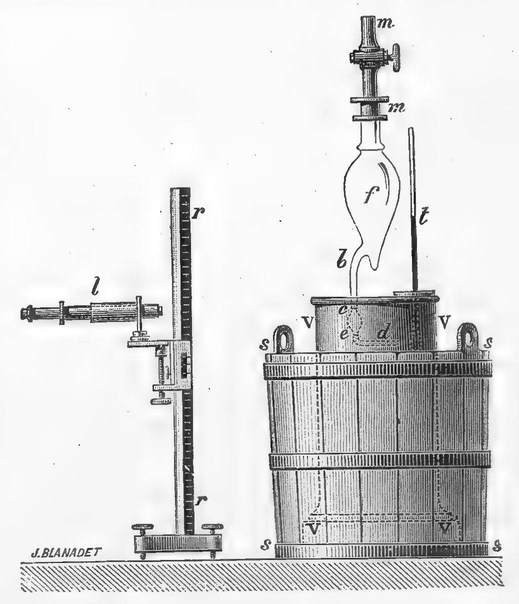


Fig. 286.

Les figures 286 et 287 font voir le dispositif employé par Poiseuille dans ses recherches.

Le liquide d'une petite ampoule *ce* s'écoulait à travers le tube capillaire *d*, dont on pouvait mesurer exactement la longueur, grâce à la forme adoptée

figure 287. Une lunette permettait de déterminer le passage du ménisque aux repères *c* et *e*, et par suite de connaître la durée de l'écoulement. Cet écoulement se faisait sous une pression d'air exercée à l'aide d'une pompe à main et relevée au manomètre. Le petit appareil était plongé dans l'eau ou un liquide de même espèce que celui qui s'écoulait ; sans cela il se formait à l'extrémité libre du tube une série de gouttes qui faussaient les résultats. Un thermomètre donnait la température.

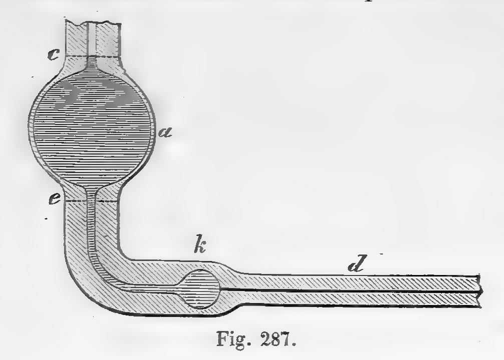


Fig. 287.

Poiseuille fit voir que dans un même appareil la quantité de liquide écoulée était proportionnelle à la pression et non à la racine carrée de la pression comme pour les tubes larges.

Puis il montra que le débit sous une même pression était en raison inverse de la longueur du tube. Il faut, pour que cette loi se vérifie, que la longueur ne tombe pas au-dessous d'une certaine limite variable avec le diamètre du tube. Ainsi, pour un diamètre de $0^{mm},01$, il suffit de quelques dixièmes de millimètre de longueur; pour $0^{mm},5$ de diamètre, il faut au moins 150 millimètres de longueur.

Enfin, dans les mêmes conditions, le débit augmente avec la quatrième puissance des diamètres. C'est-à-dire que si le diamètre double il s'écoule 16 fois plus de liquide, s'il triple il s'en écoule 81 fois plus.

On peut donc exprimer la loi d'écoulement dans les tubes capillaires par la formule

$$Q = K \frac{PD^4}{L}.$$

K étant un coefficient qui dépend de la nature du liquide et de la température.

Poiseuille a démontré qu'il existe au voisinage de la paroi des tubes capillaires une couche liquide immobile. Duclaux, par une série d'expériences ingénieuses, a vérifié l'existence de cette couche et a pu la mesurer pour un certain nombre de liquides. Il en résulte que lorsqu'un liquide s'écoule dans un tube capillaire, il se déplace sur un corps de même nature que lui-même. La résistance qu'il éprouve tient donc à ce que nous avons appelé le frottement intérieur du liquide ou à la viscosité, et l'écoulement des divers liquides dans les tubes capillaires permet de mesurer cette viscosité.

Canalisation ramifiée. — Lorsqu'au lieu d'un tuyau unique on a une canalisation ramifiée, tous les problèmes relatifs à l'écoulement des liquides se compliquent beaucoup.

Il est impossible de donner des règles générales ; dans chaque cas il faut étudier par tronçons ce qui se passe entre deux embranchements. Nous ferons

seulement remarquer que, outre les pertes de charge qui se produisent sur tout les parcours, il y a des chutes de niveau piézométrique aux environs des points d'embranchement, comme nous en avons vu se produire à l'embouchure des tuyaux dans une cavité plus large. Il y a donc, aux points de bifurcation des conduites, des pertes de charge spéciales.

Régime non permanent. — Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que le régime permanent était établi, c'est-à-dire qu'en un point quelconque le liquide conservait toujours la même vitesse.

Souvent il n'en est pas ainsi. Cela arrivera, par exemple, quand, au lieu de laisser l'eau d'un bassin à niveau constant s'écouler librement dans une conduite, ce liquide sera chassé dans les tuyaux par une pompe. Dans bien des cas l'effet de cette pompe ne sera pas de lancer un courant continu, mais de produire une série d'ondes. A l'origine de la conduite, la vitesse de l'eau, d'abord nulle, ira en croissant jusqu'à un maximum, puis retombera à zéro, pour repasser périodiquement par les mêmes états.

Ces conditions sont encore mal étudiées, mais l'on sait qu'il se produit dans ce cas de grandes pertes de charge. Pour réduire ces pertes de charge, il faut donner aux conduites une certaine élasticité, ainsi que l'a démontré M. le Pr Marey. On peut, pour arriver à ce résultat, ou bien se servir de conduites à paroi élastique, ou bien placer à l'origine de ces conduites un amortisseur à air. Supposons, par exemple, que sur une conduite BC parcourue par un courant variable de gauche à droite, on place une cloche A contenant de l'air, cela n'empêchera pas le liquide de passer. A chaque augmentation de pression venant par B, l'air A sera comprimé, il ne se produira pas d'onde brusque du côté de C. Le liquide ne s'écoulera que peu à peu vers la droite, et, malgré les variations de pression venant par B, en C le courant sera sensiblement continu. On peut rendre cette continuité aussi grande qu'on le désirera en prenant A assez grand. Dans ces conditions, les pertes de charge de la conduite sont beaucoup diminuées, et l'on constate que la même pompe donne un débit plus grand. Lorsque dans le cas d'un courant intermittent il n'y a pas à l'origine de cette conduite de réservoir élastique, le même but peut être atteint par l'élasticité des parois des tuyaux. Voici comment M. le Pr Marey a mis ce fait en évidence. L'eau d'un vase de Mariotte s'écoule à travers deux tubes, l'un en verre, l'autre en caoutchouc, placés côte à côte. L'appareil est réglé de façon qu'en régime permanent les deux tubes débitent la même quantité de liquide. Si l'on rend l'écoulement intermittent, et il suffira pour cela, comme l'indique la figure, de comprimer périodiquement l'origine des tubes avec un levier, on observe deux phénomènes. D'abord l'écoulement est, malgré les interruptions, plus régulier dans le tube élastique que dans le tube rigide. En second lieu, une mesure de volume fait voir que le tube en caoutchouc a un débit plus considérable que le tube en verre.

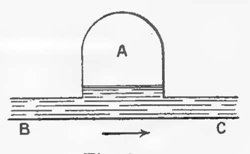


Fig. 288.

Dépense de travail nécessaire pour produire un écoulement déterminé. — Considérons une conduite AB, A étant l'ouverture par

laquelle l'eau entre dans la conduite sous une pression P, v étant la vitesse d'écoulement.

Tout se passe comme si en A il y avait un piston remplissant exactement le tuyau et s'avançant avec une vitesse v. Quelle est la quantité de travail dépensée pour faire avancer le piston? La pression par unité de surface étant p, la pression totale sur le piston est pS, S étant la surface de ce piston. Comme en une seconde il parcourt un chemin v, le travail dépensé est pSv. Mais Sv est la quantité d'eau débitée par seconde, donc le travail est représenté par pQ.

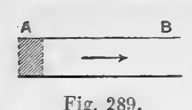


Fig. 289.

C'est-à-dire que le travail dépensé par seconde pour chasser un liquide dans une conduite est égal au produit de la quantité de liquide débitée par la pression à l'origine de la conduite.

Cette formule permet d'évaluer le travail dépensé par les pompes en général et en particulier par le cœur.

CŒUR. — CARDIOGRAPHIE

Par M. WERTHEIMER

Chez les vertébrés supérieurs, le cœur est double, c'est-à-dire composé de deux moitiés, l'une droite, l'autre gauche, accolées l'une à l'autre, mais complètement distinctes à partir de la naissance. Chaque moitié comprend deux poches musculaires, l'oreillette et le ventricule, qui communiquent l'une avec l'autre par un orifice muni de valvules. Le cœur gauche reçoit le sang des poumons et l'envoie à tout le corps, le cœur droit reçoit le sang de toutes les parties du corps et l'envoie aux poumons.

L'action du cœur, organe central de la circulation, a été justement comparée à celle d'une pompe foulante qui pousse d'une façon intermittente dans les artères le sang qu'il reçoit des veines : l'effort musculaire du ventricule développe la force qui entretient le mouvement incessant du liquide nourricier. Cette définition de l'action du cœur serait cependant incomplète si on n'ajoutait qu'il fonctionne aussi comme pompe aspirante et que s'il refoule le sang dans les artères il exerce en même temps un appel sur le contenu des veines. Ce dernier rôle, qui lui a souvent été contesté, est pourtant bien réel ; il est, à la vérité, tout à fait accessoire.

La fonction des oreillettes n'a qu'une faible importance, comparée à celle des ventricules : elles peuvent cesser temporairement leurs mouvements sans que la circulation soit compromise. Ce sont en quelque sorte des réservoirs extensibles qui permettent au sang des veines de couler sans interruption vers le cœur pendant que le ventricule se contracte, en même temps qu'ils maintiennent à l'entrée de la cavité ventriculaire une certaine quantité de liquide prête à la remplir après chaque coup de pompe.

Les diverses parties du cœur se contractent et se reposent alternativement suivant un ordre régulier. On appelle systole leur état d'activité, et diastole leur état de relâchement et de repos. Les deux oreillettes se contractent ensemble, puis les deux ventricules ; pendant la systole auriculaire, les deux ventricules sont en diastole ; pendant la systole ventriculaire, les oreillettes se relâchent à leur tour ; enfin arrive une période de repos général après laquelle les mouvements reviennent dans le même ordre. Dans une révolution cardiaque, nous pouvons donc distinguer : 1° la systole auriculaire, 2° la systole ventriculaire, 3° le repos général ou pause.

I. — MOUVEMENTS DU CŒUR PENDANT UNE RÉVOLUTION CARDIAQUE

A. ***Systole auriculaire.*** — La contraction des oreillettes débute par les embouchures des veines qui viennent s'ouvrir dans leur cavité en même temps que les auricules subissent un vif mouvement de retrait. Chez les animaux à sang froid, on voit encore plus nettement les battements des confluents veineux précéder ceux du cœur lui-même.

Puis les oreillettes se rétrécissent dans tous leurs diamètres. Leur contraction chasse donc du sang dans les ventricules dont elle ne fait toutefois qu'achever la réplétion, car pendant le repos du cœur le sang s'est écoulé sans interruption des veines dans les cavités du cœur.

Comme phénomène secondaire digne d'intérêt, il faut noter le reflux qui se fait vers les gros troncs veineux sous l'influence de la contraction auriculaire. En se servant de l'hémodromographe de Chauveau, Fr. Franck a, en effet, constaté que l'oreillette droite refoule dans la veine cave supérieure une partie du sang qu'elle contient : le courant centrifuge est arrêté par les valvules de la veine jugulaire, de sorte que dans celle-ci il ne se traduit plus que par une simple ondulation qui est toutefois un des éléments du pouls veineux normal (1).

L'oreillette ne se vide pas complètement.

B. ***Systole ventriculaire.*** — Pendant que les oreillettes sont relâchées, les ventricules se contractent.

1° Phénomènes perceptibles a la surface du ventricule. — Leur systole s'accompagne de modifications importantes dans la consistance, la forme, la longueur, la situation du cône ventriculaire.

Le ventricule, qui était mou et flasque pendant la diastole, durcit brusquement et repousse avec force la main ou le corps quelconque qui tend à le déprimer.

Son diamètre antéro-postérieur augmente, tandis que le diamètre transversal diminue, d'après les mensurations pratiquées *in situ* par Ludwig chez le chat (2). L'organe, d'aplati qu'il était d'avant en arrière, tend à prendre une forme globuleuse, et sa base, qui était elliptique, tend à devenir circulaire. Chez le cheval, dont le cœur est aplati latéralement, c'est au contraire le diamètre transversal qui augmente aux dépens du diamètre antéro-postérieur (Chauveau et Faivre) (3).

Le passage instantané des ventricules de la forme conique à la forme globuleuse entraîne aussi le raccourcissement de leur diamètre longitudinal. Les commissions des médecins de Dublin et de Londres, ainsi que Ludwig, constatèrent, au moyen des mesures prises au compas, que le cœur se raccourcit réellement, lors de la systole ventriculaire. Chauveau et Faivre s'en assurèrent

(1) *Arch. de physiol.*, 1890, p. 347.
(2) *Zeitschr. f. rat. Med.*, VII, 1848. — Cependant, d'après Haycraft, le diamètre antéro-postérieur diminuerait également (*Journ. of Physiol.*, XII, p. 452, 1891. — *Ibid.*, XIX, p. 496, 1896).
(3) *Gaz. méd. de Paris*, 1856, p. 572.

de nouveau en suspendant un cœur excisé de manière que sa pointe vînt effleurer un plan horizontal et fixe : à chaque systole, la pointe s'écartait sensiblement du plan, pour l'affleurer de nouveau à la diastole.

Plus récemment Roy et Adami (1) ont, au moyen d'un dispositif spécial, étudié sur le cœur, mis à découvert, les variations de distance de deux points pris sur une ligne parallèle au sillon interventriculaire et ont vu qu'ils se rapprochaient au moment de la systole : le raccourcissement portait aussi bien sur le ventricule gauche que sur le ventricule droit. Hesse, par contre, en soumettant brusquement à la rigidité thermique, pour les mettre en état de contraction maximum, des cœurs récemment extraits de la poitrine, n'a obtenu le raccourcissement que du ventricule droit : le ventricule gauche et, par conséquent, le grand axe du cœur, n'avaient pas subi de modifications : mais la méthode employée est sujette à bien des objections (2).

La diminution du diamètre longitudinal devrait avoir pour conséquence une ascension de la partie la plus mobile du cœur, la pointe, vers la base qui, elle, est fixée aux gros vaisseaux. L'expérience démontre qu'il n'en est rien, que c'est au contraire la pointe qui représente la partie relativement la plus fixe. Chauveau et Faivre se sont assurés par l'exploration directe, en introduisant la main par l'abdomen à travers le diaphragme, que le sommet du cône ventriculaire reste constamment en rapport avec le fond du péricarde.

Pour comprendre un raccourcissement du cœur sans déplacement de la pointe, il faut nécessairement que ses effets soient contre-balancés par un effet inverse. C'est effectivement la base qui marche vers la pointe, comme on peut le constater directement sur un cœur mis à nu : à chaque systole le sillon auriculo-ventriculaire s'abaisse. Haycraft (3) a vérifié le fait chez l'animal intact en plongeant à travers la paroi thoracique des aiguilles dans la substance musculaire du cœur : dans ces conditions, l'extrémité libre de l'aiguille se meut en sens inverse de l'extrémité profonde. Haycraft a trouvé de la sorte que si l'aiguille est implantée au niveau de la base, son extrémité interne s'abaisse, et que ses déplacements sont de moins en moins marqués au fur et à mesure qu'elle est enfoncée dans un point plus voisin du sommet du ventricule.

La fixité de la pointe a été attribuée par Chauveau et Faivre au mouvement de recul du cœur. En effet, au moment où le sang s'échappe brusquement par les orifices artériels, le point de la paroi qui leur est opposé supporte un excès de pression qui doit repousser l'organe dans le sens de son grand axe.

Le recul n'est pas douteux et on a pu l'assimiler à celui que subit une arme à feu au moment de la décharge. On a objecté, il est vrai, que les conditions ne sont pas comparables parce que le sang rencontre à son évacuation une résistance considérable, alors que le départ de la balle se fait pour ainsi dire sans obstacle (4). Il est évident que le choc en retour serait plus marqué si l'issue du sang avait lieu librement, mais du moment qu'il peut

(1) *The Practitioner*, 1890, I, p. 82.
(2) *Arch. f. Anat. u. Physiol. anat., Abth.*, 1880, p. 328.
(3) *Journ. of Physiol.*, XII, p. 452, 1891.
(4) Voy. Grutzner, *Deutsche med. Wochenschr.*, 1890, p. 695.

s'échapper par les orifices artériels, la différence de pression, nécessaire au recul, s'établit.

L'élongation des troncs aortique et pulmonaire au moment de la systole peut aussi, d'après Giraud-Teulon (1), contribuer à l'abaissement de la base vers la pointe. Toujours est-il que ce dernier mouvement ne s'observerait plus, d'après Guttmann et Jahn (2), à la suite de la ligature des grosses veines. On comprend en effet que, le cœur ne recevant plus de sang, ni le recul ni l'élongation des artères ne pourront plus se produire.

Cependant chez la grenouille le mouvement de la base vers la pointe s'exécuterait encore sur un cœur vide de sang, examiné dans sa situation normale : l'agencement spécial des fibres musculaires du ventricule pourrait donc aussi avoir sa part dans le phénomène (Tigerstedt) (3).

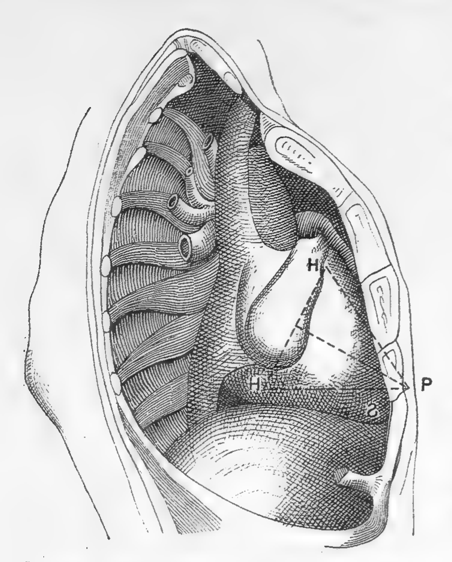


Fig. 290. — Redressement de l'axe du cœur pendant la systole. — S, pointe du cœur pendant la diastole; P, sa situation pendant la systole (d'après Ludwig).

Ludwig a montré encore que pendant la systole l'axe du ventricule se redresse. Tandis que dans la diastole il est oblique (HHS) par rapport au diamètre transversal de la base; il lui devient perpendiculaire (HHP) pendant la systole et la pointe du cœur se porte en avant (fig. 290).

Enfin on observe un mouvement de torsion ou mouvement spiroïde qui tourne légèrement à droite la face antérieure du cœur, la face postérieure à gauche. On peut le comparer à celui qu'exécuterait la main gauche en complétant un mouvement de pronation. On l'a attribué à ce que les troncs de l'artère pulmonaire et de l'aorte tendent à se redresser au moment où ils sont distendus par le sang (Kornitzer), la première se portant un peu à droite, la seconde un peu en avant. Cependant, comme il persiste encore quand le cœur se contracte à vide, on peut invoquer aussi la disposition spéciale des fibres musculaires de la paroi. Il en est, effectivement, qui, parties de l'anneau fibreux de l'orifice auriculo-ventriculaire droit, se dirigent obliquement de haut en bas et de droite à gauche, contournent le bord gauche du cœur et s'insèrent en partie sur la face postérieure du ventricule gauche : elles peuvent donc produire le mouvement indiqué.

2° Phénomènes qui se passent a l'intérieur du ventricule. — Au moment où le ventricule se contracte sur le liquide qu'il contient, celui-ci cherchera à s'échapper par les orifices percés à la base de la poche cardiaque, c'est-à-dire

(1) *Gaz. méd. de Paris*, 1856, p. 557.
(2) Cités d'après Tigerstedt, *Lehrb. d. Physiol. des Kreislaufes*, 1893, p. 74.
(3) *Ibid.*, p. 74.

les orifices artériels et les orifices auriculo-ventriculaires. Mais ceux-ci se ferment, ceux-là s'ouvrent, grâce à la disposition des valvules qui les garnissent et qui impriment au cours du sang une direction déterminée et constante.

Il est important d'examiner le fonctionnement de ces soupapes et le rapport de leurs mouvements avec les divers actes cardiaques. Ce dernier point a été étudié récemment par Chauveau soit au moyen de l'inscription électrique, soit avec les appareils transmetteurs à air, et ces deux méthodes ont fourni des renseignements précieux que nous aurons à utiliser (1).

La valvule auriculo-ventriculaire gauche ou mitrale est formée de deux valves principales; la valvule droite ou tricuspide est découpée en trois festons. Sur le bord libre et la face externe de ces valves viennent s'insérer des cordons tendineux qui s'attachent par leur autre extrémité au sommet de saillies musculaires appelées muscles papillaires : quelques-uns de ces cordages s'attachent directement à la paroi.

Gad a construit un appareil pour la démonstration du jeu de ces valvules sur le cœur du bœuf (2). L'expérience classique de Lower permet d'ailleurs de reconnaître que même sur le cadavre elles s'opposent à tout reflux vers la cavité des oreillettes. Cependant il est bon de savoir que dans cette épreuve la valvule tricuspide se montre souvent insuffisante chez l'adulte, presque toujours chez le vieillard (3).

Le mécanisme de l'occlusion des valvules auriculo-ventriculaires, sur le vivant, a donné lieu à bien des discussions. Un premier point qui paraît bien établi, c'est qu'elles se ferment dès le début de la systole, et si rapidement qu'elles empêchent toute régurgitation vers l'oreillette. La disposition anatomique des valvules et des cordages est telle que pendant la réplétion du ventricule, ces replis ne peuvent s'accoler à la paroi, mais sont, au contraire, maintenus par leur bord libre vers la ligne médiane. De plus, au moment où l'oreillette envoie son contenu dans le ventricule, il se forme un courant qui au centre est dirigé vers la pointe, et qui sur les côtés se porte vers la base, entre la paroi et la valvule : lors donc qu'à la fin de la systole auriculaire le courant axial diminue d'intensité, le courant marginal tend à rapprocher immédiatement les bords libres des valves (4). Baumgartner a fait valoir aussi que le ventricule distendu par l'ondée auriculaire réagit par son élasticité sur le sang qu'il renferme et que cette tension passive suffit pour accoler complètement les valves au moment où la contraction de l'oreillette cesse ou même diminue d'intensité. Il en a du reste donné la preuve expérimentale (5). Enfin, d'après quelques auteurs, des fibres musculaires qui descendent de l'oreillette sur les valvules auriculo-ventriculaires contribueraient à relever ces replis pendant la systole de l'oreillette.

Aussi, au moment où celle-ci est terminée, les bords libres des valves,

(1) Nous n'avons pu malheureusement les mettre à profit aussi largement que nous l'aurions voulu, ces documents ayant paru, pour la plupart, quand cet article était déjà mis en pages. — Voy. *Journ. de physiol et de pathol. génér.*, 1899, p. 377. — *Ibid.*, p. 712. — *Ibid.*, p. 785.

(2) *Arch. f. Anat. u. Physiol.*, 1886, p. 380.

(3) Marc Sée, *Arch. de physiol.*, 1874, p. 850.

(4) V. Frey, *Die Untersuchung des Pulses*, p. 97. — Krehl, *Arch. f. Physiol.*, 1889, p. 289.

(5) *Arch. f. Anat. u. Physiol.*, 1843, p. 464.

poussés en haut et vers la ligne médiane, se sont déjà rapprochés. Quand débute la systole ventriculaire, le sang est refoulé sous ses replis, les soulève vers les oreillettes, de sorte qu'ils forment ainsi au niveau de l'orifice auriculo-ventriculaire une voûte qui sépare les deux cavités. Cette manière de concevoir l'occlusion des valvules a pour elle l'expérimentation directe. Chauveau et Faivre ont constaté, en effet, en introduisant le doigt par l'auricule jusqu'au niveau de l'orifice auriculo-ventriculaire, qu'à chaque systole le doigt est pressé circulairement par les valvules qui tendent à s'adosser : en retirant le doigt au-dessus de l'orifice, on sent la valvule venir en frapper la pulpe.

L'occlusion des valvules est donc passive et due à la pression même du sang : le rétrécissement de l'orifice auriculo-ventriculaire la rend plus parfaite, en facilitant l'affrontement marginal de ces replis. La contraction des muscles papillaires a pour rôle de fixer solidement les valvules par en bas et d'empêcher leur renversement vers l'oreillette : elle vient contre-balancer le raccourcissement de l'axe longitudinal du cœur qui amènerait le relâchement des cordes tendineuses. Ces muscles agissent avec d'autant plus d'efficacité en ce sens, que les cordages qui leur font suite s'insèrent non seulement au bord libre, mais aussi à la face externe des valvules.

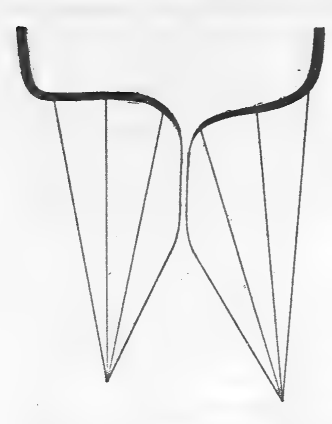


Fig. 291. — Position donnée à la valvule auriculo-ventriculaire par la tension de ses cordages (d'après Krehl).

Sandborg et Worm Muller (1), d'après des expériences faites sur des cœurs de bœuf, *post mortem*, Krehl en se basant sur l'étude anatomique des valvules et des cordages, ont donné de la position prise par les valvules auriculo-ventriculaires pendant la systole une description qui se rapproche beaucoup de celle de Chauveau et Faivre. La figure 292 reproduit le schéma de Krehl.

Une autre opinion qu'on peut appeler, par opposition à la précédente, la théorie de l'occlusion active, veut que les valvules soient fortement attirées vers la cavité du ventricule par la contraction des muscles papillaires, qui en même temps rapprochent et froncent leurs bords libres. Les replis valvulaires sont assimilés dans leurs éléments passifs à une ouverture de bourse munie de ses cordons, auxquels sont adaptés des éléments actifs chargés de les tirer de la circonférence au centre. Cette théorie a été soutenue sous des formes diverses par un grand nombre de physiologistes et de médecins. Marc Sée lui a donné des développements nouveaux en l'appuyant sur des notions anatomiques, très minutieusement étudiées; mais, comme on l'a vu, l'expérience a prononcé contre elle.

Les valvules auriculo-ventriculaires étant fermées, le sang qui trouve

(1) *Arch. de Pfluger*, t. XXII, p. 412, 1880.

de ce côté un obstacle insurmontable se porte vers les orifices artériels dont les valvules se soulèvent dès que la pression du sang dans le ventricule est devenue supérieure à la pression aortique. Dès que celle-ci sera, au contraire, devenue supérieure à celle-là, les valvules sigmoïdes s'abaisseront et empêcheront le retour du sang vers le cœur.

Ces valvules sont suspendues à l'entrée des troncs artériels comme des nids de pigeons; elles sont au nombre de trois dans chacune des artères et présentent un bord adhérent fixé sur l'anneau fibreux artériel, un bord libre garni en son milieu d'un petit renflement fibreux, nodule d'Arantius ou de Morgagni, une face supérieure concave, une face inférieure convexe. En face des valvules, les parois des deux troncs artériels forment des bosselures, appelées sinus de Valsalva. Ceradini a montré que dans la position d'équilibre de ces replis, quand la pression est égale sur leurs deux faces, elles limitent une ouverture triangulaire, à bords curvilignes.

Le mécanisme de leur occlusion paraît fort simple; elles se rapprochent en cédant dans le sens de la pression la plus forte. Il semble aussi que le mouvement rétrograde du sang, qui amène leur fermeture, doive s'accompagner de la régurgitation d'une certaine quantité de liquide, aussi faible soit-elle, vers le ventricule. Mais on a voulu voir dans ces valvules, comme dans les valvules auriculo-ventriculaires, des soupapes parfaites, ne permettant, à aucun degré, le reflux.

Ainsi, d'après Hesse (1) et Krehl (2), les orifices artériels perdent, pendant la systole, leur forme arrondie, pour prendre, sous l'influence de la contraction des saillies musculaires qui les entourent, la forme d'une fente étroite au-dessus de laquelle le vaisseau s'élargit brusquement. C'est là une condition essentiellement favorable à la formation, autour du bord libre des valvules, de tourbillons, qui par leur direction tendent constamment à rapprocher ces replis et qui, en effet, les rapprochent instantanément au moment même où cesse l'afflux ventriculaire. Ce mécanisme implique donc qu'il reste entre la paroi artérielle et les valvules, c'est-à-dire dans les sinus de Valsalva, un espace rempli de liquide et que, par conséquent, ces replis ne viennent pas s'accoler à la face interne des vaisseaux.

Déjà Ceradini (3), en expérimentant sur des appareils schématiques dans des conditions semblables à celles qui sont réalisées lors de la pénétration du sang dans les grosses artères, avait cherché à démontrer que la fermeture des valvules est « fonction de la fin de la systole » et précède le relâchement du ventricule. C'est aussi le mécanisme des tourbillons qui intervient, mais sous une forme différente. Ceradini a vu qu'au moment où l'afflux sanguin cesse brusquement, il se produit le long de la paroi un courant rétrograde qui, au niveau des sinus de Valsalva, se porte vers le courant axial animé d'un mouvement plus rapide : c'est précisément la différence de vitesse des couches axiales et des couches périphériques du liquide qui est la cause du

(1) *Loc. cit.*
(2) *Abhandl. d. sächs. Gesellsch. d. Wissensch.*, XVII, p. 348, 1891.
(3) *Der Mechanismus der halbmondförmigen Klappen*, Leipzig, 1872.

phénomène. Le courant rétrograde provoquera le rapprochement instantané des valvules, dès que le ventricule cesse de se vider.

Cependant, comme le fait remarquer Martius (1), l'absence de tout reflux ne se comprend que si le relâchement ventriculaire ne suit pas immédiatement la phase d'évacuation. Il faut que les forces quelconques qui entrent en jeu pour opérer le rapprochement des valvules aient le temps d'agir avant que la cavité du ventricule ne se soit reformée. Il serait donc indispensable que le ventricule restât encore un instant en contraction après s'être vidé. Ce mécanisme peut se comparer alors à celui d'une pompe dans laquelle, pour éviter le reflux du liquide au moment du retour du piston, on force celui-ci à séjourner plus ou moins longtemps au point mort, afin que la soupape ait le temps de se fermer, soit par son propre poids, soit par l'action d'un ressort.

D'après cette manière de voir, lors du relâchement du ventricule, les valvules sont donc déjà rapprochées, l'orifice est déjà fermé et la différence brusque de pression qui se produit alors sur les deux faces opposées de ces replis n'a d'autre effet que de les tendre davantage et de rendre l'occlusion plus parfaite. Il y aurait lieu de distinguer, avec un certain nombre de physiologistes, la fermeture proprement dite des valvules et leur tension.

Mais, la prolongation de la systole après la période d'évacuation est douteuse, du moins chez les mammifères ; car chez la grenouille elle paraît exister [Gad et Cowl (2), Hofmeister (3)]; et il est très probable que l'occlusion des valvules sigmoïdes s'accompagne d'un faible reflux de sang vers la cavité ventriculaire (4). C'est aussi à cette conclusion que mènent les expériences de Chauveau, puisque « les valvules aortiques s'abaissent, ferment leur orifice et se tendent brusquement, en produisant le deuxième bruit du cœur, juste au moment où le ventricule se relâche pour se mettre en diastole et où la valvule mitrale, en s'abaissant, ouvre l'orifice auriculo-ventriculaire gauche ».

Quand les valvules sont abaissées, elles forment par la juxtaposition de leurs bords libres une étoile triangulaire dont le centre est occupé par les nodules fibreux. Toutefois, les valvules s'adossent non seulement par leurs bords libres, mais encore par leurs faces (Chauveau, Traube); elles présentent à cet effet de chaque côté du nodule une surface amincie en forme de croissant appelée lunule : la présence des nodules n'est donc pas indispensable à l'occlusion parfaite de l'orifice artériel : ils manquent d'ailleurs chez les animaux (Retzius).

3° Aspiration systolique. — La systole ventriculaire, qui a surtout pour effet de chasser du sang dans les artères, exerce aussi accessoirement son influence sur la circulation de retour. Quand le ventricule projette en dehors de la cavité close qu'est le thorax une certaine quantité de liquide, il en résulte une augmentation du vide thoracique et, par conséquent, une aspi-

(1) *Zeitschr. f. klin. Med.*, 1891, p. 109.
(2) *Centralbl. f. Physiol.*, 1889, p. 264.
(3) *Arch. de Pfluger*, t. XLIV, p. 369.
(4) Voy. Hoorweg, *Arch. de Pfluger*, t. XLVI, 1890, p. 175.

ration dont l'action se manifeste sur le contenu des oreillettes et des troncs veineux qui y aboutissent. Mais ce n'est pas de ce phénomène sur lequel on aura à revenir qu'il est question ici. Il existe aussi une cause d'aspiration propre au cœur lui-même ; déjà signalée par Purkinje, Vega, Weyrick (1), elle a été plus complètement étudiée par Chauveau et Lefèvre (2), et par Frédéricq (3). Cette cause n'est autre que le mouvement brusque de la base du cœur vers la pointe : l'abaissement du plancher auriculo-ventriculaire constitué à ce moment par les valvules mitrale et tricuspide amène un agrandissement de la cavité auriculaire et une accélération du courant veineux. Ce qui prouve que cette aspiration est indépendante du vide thoracique, c'est qu'elle se manifeste encore après ouverture de la poitrine.

« La systole des ventricules agit donc à la fois comme pompe foulante du côté des artères et comme pompe aspirante du côté des veines, et, comme le dit fort bien Lefèvre, le même coup de piston produit en même temps le refoulement et l'aspiration. » (Frédéricq.)

C. ***Diastole.*** — Le relâchement du ventricule est considéré, en général, comme un phénomène purement passif : des fibres spéciales qui auraient pour effet de dilater activement la poche cardiaque n'existent pas. Il faut cependant signaler les expériences récentes de Stefani (4), qui font soutenir à ce physiologiste que le relâchement du cœur est soumis à l'influence nerveuse. On remplit d'eau le péricarde et on détermine la pression nécessaire pour mettre obstacle à la diastole cardiaque : si on excite ensuite le bout périphérique du pneumogastrique, le sang peut de nouveau affluer vers le cœur. Stefani trouve encore que pour empêcher la diastole, il faut une pression dans le péricarde plus forte quand les pneumogastriques sont intacts que lorsqu'ils sont coupés.

Cependant, pour la plupart des physiologistes, la diastole n'est que le retour pur et simple du muscle à l'état de repos : et il est possible d'expliquer, comme on le verra plus loin, l'aspiration dont elle s'accompagne incontestablement, sans avoir recours à l'hypothèse d'agents spéciaux, antagonistes de ceux qui président à la systole.

Il est inutile d'insister sur les modifications extérieures que présente le ventricule pendant sa diastole. Quant aux phénomènes internes, ils sont des plus simples : lorsque la valvule auriculo-ventriculaire s'est abaissée, le sang coule de nouveau librement de l'oreillette dans le ventricule sous l'influence de la pression veineuse et aussi sous l'influence de l'aspiration pulmonaire qui toutefois ne peut s'exercer utilement que sur le ventricule droit, à parois plus minces. Il va sans dire que les oreillettes cèdent encore bien plus facilement à l'action du vide pleural, dès que leur contraction est terminée.

(1) Cités par ROLLET, in *Hermann's Handb. d. Physiol.* : *Blutbewegung*, p. 175.
(2) LEFÈVRE, *De l'aspiration propre du cœur*. Th. de Lyon, 1884.
(3) *Trav. du laboratoire* de L. FRÉDÉRICQ, 1883, p. 113.
(4) Cité d'après TIGERSTEDT, *loc. cit.*, p. 143.

II. — VARIATION DE PRESSION DANS LES CAVITÉS DU CŒUR. CARDIOGRAPHIE MANOMÉTRIQUE

A. ***Méthodes.*** — Chauveau et Marey ont inauguré, dans leurs mémorables expériences sur le mécanisme du cœur, la méthode cardiographique et ont pu enregistrer les variations de pression qui traduisent les phases successives

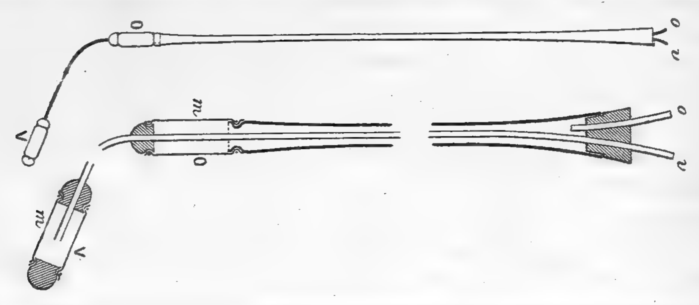


Fig. 292. — Sonde cardiaque droite de Chauveau et Marey; *m*V, ampoule ventriculaire; *m*O ampoule auriculaire.

de son activité (1). L'instrument dont ils se sont servis et qui permet d'aller chercher dans le cœur lui-même les mouvements de cet organe est représenté figure 292. Deux ampoules élastiques remplies d'air sont associées sur une sonde à double courant qui est introduite dans le cœur droit par la veine jugulaire. La distance qui les sépare est telle que quand l'extrémité de la sonde vient buter contre le fond du ventricule, l'une se trouve dans le ventricule, l'autre dans l'oreillette. Chacune de ces ampoules est reliée par un tube de caoutchouc à un tambour à levier. Elles sont, d'ailleurs, formées d'une membrane de caoutchouc appliquée sur une carcasse de fil d'acier, pour qu'elles ne puissent s'affaisser entièrement sous la pression du sang. Dans les expériences de Chauveau et Marey, une troisième ampoule appliquée sur la paroi thoracique était destinée à explorer le choc précordial. Une sonde cardiaque simple servait à pénétrer dans le ventricule gauche par la carotide et l'aorte : on pouvait inscrire simultanément les mouvements des deux ventricules.

François Franck (2), Gley (3), Meyer (4), ont décrit des sondes cardiographiques applicables au cœur du chien, avec des modifications destinées à faciliter leur introduction et leur mise en place : elles sont d'ailleurs construites sur le même modèle que celles de Chauveau et Marey.

Les sondes, au lieu de se terminer par une dilatation ampullaire, peu-

(1) Appareils et expériences cardiographiques (*Mém. de l'Acad. de médecine*, 1863, p. 268. — *Gaz. méd. de Paris*, 1861. p. 675). — Articles Cœur et Cardiographes du *Dict. encyclop. des sciences méd.*

(2) *Arch. de physiol.*, 1891, p. 765.

(3) *C. R. des séances de la Soc. de biol.*, 1894, p. 445.

(4) *Ibid.*, 1894, p. 443.

vent être, au contraire, ouvertes à leur extrémité, et comme la cavité ventriculaire est alors en communication directe avec l'appareil enregistreur, il faut mettre la sonde en rapport avec un manomètre. Mais un manomètre à mercure ne pourrait, à cause de son inertie, traduire exactement les variations si rapides de la pression intraventriculaire : il est donc indispensable d'avoir recours à un manomètre élastique. Tel est le procédé qui a été employé par Fick, Hurthle, v. Frey et Krehl. La construction de ce manomètre varie sui-

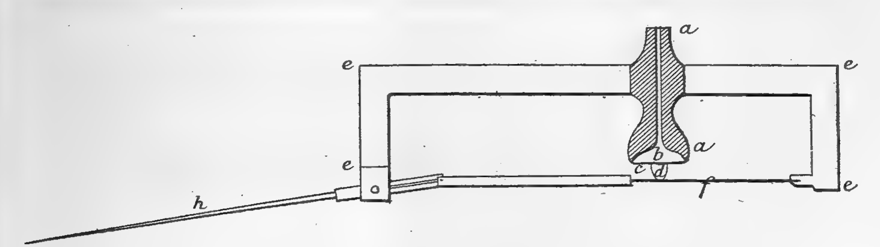


Fig. 293. — Manomètre élastique de Fick.

vant les expérimentateurs : on se bornera, à ce sujet, à quelques indications générales.

Le manomètre de Fick (1) est un type des appareils de ce genre (fig. 293). Il consiste en un tube métallique à lumière très étroite (*aa*), qui se termine inférieurement par une fossette aplatie (*b*). Par-dessus cette dernière on tend une mince lamelle de caoutchouc *c* qui porte à son centre un bouton d'ivoire *d*. Celui-ci presse sur une lame d'acier *f* fixée sur le cadre *eeee*, lequel porte aussi la pièce *aa*. Quand dans l'espace *b* la pression augmente, la lamelle de caoutchouc se bombe et force le ressort à s'infléchir : les déplacements du ressort sont amplifiés par le levier *h*.

Le tonomètre de Frey (2), le manomètre à ressort de Hurthle (3) (Federmanometer), sont des modifications à l'instrument de Fick. Hurthle s'est servi d'un autre appareil du même genre (le manomètre à membrane ou Gummi manometer), qui n'est autre qu'un tambour de Marey de petit modèle, mais fermé par une forte membrane élastique. Gad a remplacé la lame de caoutchouc par une lamelle métallique (4). Hurthle a particulièrement insisté, dans la construction de ses manomètres, sur l'avantage qu'il y a à réduire au minimum les déplacements de la masse de liquide mise en mouvement, si l'on veut que l'instrument puisse suivre les variations rapides de pression, et dans ce but il a donné à la membrane un très faible diamètre, 7 millimètres et même 5,5 millimètres. Pour la même raison, il recommande la transmission exclusive par les liquides, de préférence à la transmission mixte par liquide et air employée par Fick et Frey : la présence de l'air compressible augmente en effet les déplacements du liquide. De longues discussions se sont d'ailleurs

(1) *Arch. de Pfluger*, XXX, p. 597, 1883.
(2) *Loc. cit.*, p. 47.
(3) *Arch. de Pfluger*, XLIII, p. 399, 1888.
(4) *Centralbl. f. Physiol.*, 1889, p. 318.

élevées entre v. Frey et ses contradicteurs sur les avantages et les inconvénients respectifs des deux modes de transmission (1).

L'appareil de Roy et Rolleston (2), qui appartient encore au type des manomètres élastiques, diffère cependant notablement des précédents. C'est un petit cylindre creux qu'une canule met en communication avec le ventricule, et dans lequel joue un piston auquel se transmettent les variations de pression. Ce piston est rattaché à un levier enregistreur fixé lui-même à un ressort d'acier, de telle sorte que les excursions du levier sont proportionnelles à la force employée pour vaincre la résistance à la torsion du ressort, c'est-à-dire proportionnelle à la pression qui agit sur le piston.

Frédéricq (3) et Fr. Franck (4) se sont servis de sphygmoscopes, mis en communication avec un tambour de Marey.

Porter (5) a décrit récemment un procédé spécial qui permet de mettre le manomètre élastique en communication avec le ventricule à un moment quelconque de la systole. Une canule double est introduite par la sous-claviere et l'aorte dans le ventricule gauche. Une des canules est mise en communication avec un manomètre de Hurthle renversé (B), c'est-à-dire le levier en bas. La deuxième est reliée également, mais par un tube muni d'un robinet, à un second manomètre (A) qui inscrira les courbes. Sur le levier du manomètre B est appliqué un fil métallique dont les extrémités viennent plonger dans deux cupules de mercure. Quand la pression augmente dans le ventricule, et que par conséquent le levier s'abaisse, le contact du fil avec le mercure complète un circuit électrique et envoie un courant dans un fort électro-aimant dont l'armature ouvre le robinet interposé entre la deuxième canule et le manomètre A. Lorsqu'au contraire le fil du manomètre B abandonne le mercure, l'armature reprend sa position première et le robinet se ferme. Pendant que le courant traverse l'électro-aimant, le manomètre A, ainsi mis en communication avec la cavité du ventricule, grâce à l'ouverture du robinet, inscrit la courbe de pression. On peut donc s'arranger de telle sorte que les bouts du fil adapté au manomètre B soient, pendant la diastole, plus ou moins rapprochés de la surface du mercure, et que le manomètre A inscrive la courbe à partir d'un point plus ou moins voisin de son sommet. Quand on commence à enregistrer ainsi la courbe très près de son maximum, la fermeture du robinet laissera dans le manomètre A une pression déjà très élevée : à la systole suivante, l'instrument n'aura plus à indiquer que la différence entre cette pression et le maximum, c'est-à-dire qu'on a ainsi un moyen de rendre presque insignifiante la cause d'erreur due à l'inertie ; le sommet de la courbe sera donc inscrit avec ses véritables caractères.

La voie d'introduction des appareils cardiographiques a également varié,

(1) V. HURTHLE, *Arch. de Pfluger*, LV, p. 319, 1893. — FREY, *Arch. f. Physiol.*, 1893, p. 1. — *Centralbl. f. Physiol.*, 1893, p. 453, et 1894, p. 267. — CONTEJEAN, *Ibid.*, 1894, p. 264, et *Arch. de physiol.*, 1894, p. 421.

(2) *Journ. of Physiol.*, VIII, p. 241.

(3) *Bull. de l'Acad. belg.*, 1886. — *Arch. de biol.*, VIII, et *Trav. du laborat.*, II, p. 33. — *Arch. de biol.*, t. XIV, 1895. — *Trav. du laborat.*, t. V, p. 65.

(4) *Arch. de physiol.*, 1892, p. 105.

(5) *Journ. of experim. Medic.*, vol. I, n° 2, 1896.

suivant les expérimentateurs. Tandis que la majorité des physiologistes ont, à l'exemple de Chauveau et Marey, fait pénétrer la sonde cardiaque par la jugulaire ou la carotide sans ouvrir le thorax, Rolleston, Roy et Adami introduisent soit par l'auricule, soit par la pointe du cœur, la canule appropriée qui doit être mise en relation avec leur appareil. Frédéricq et François Franck passent également par l'auricule pour mettre le sphygmoscope en place. Enfin, Magini (1) pénètre à travers la paroi thoracique dans le cœur au moyen d'un trocart, et son exemple a été imité par Rolleston, Roy et Adami, qui

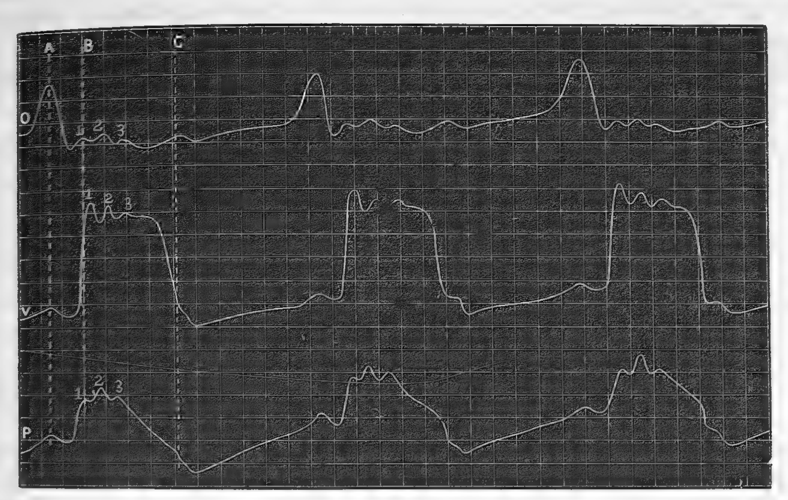


Fig. 294. — Tracés de la pression auriculaire O, de la pression ventriculaire V, du choc du cœur P, recueillis simultanément chez le cheval (d'après Chauveau et Marey).

se sont également servis de cet instrument chez des animaux à poitrine ouverte.

B. ***Analyse des tracés cardiographiques.*** — Les tracés classiques de Chauveau et Marey nous serviront de type (fig. 294).

La ligne supérieure O correspond aux variations de la pression du sang dans l'oreillette, la ligne moyenne V à la pression dans le ventricule, la ligne P à la pulsation ou choc du cœur, que nous laisserons de côté pour le moment.

La systole de l'oreillette, comme on le voit, n'a qu'une durée très brève, tandis que celle du ventricule se prolonge beaucoup plus longtemps. L'action de la systole auriculaire se manifeste sur la courbe du ventricule par un petit soulèvement qui se trouve sur le prolongement de la ligne ponctuée A. Si certains expérimentateurs n'ont observé cette ondulation qu'exceptionnellement, cela tient sans doute au défaut de sensibilité du manomètre employé. Cependant il peut se faire, si la systole ventriculaire suit de très près celle de l'oreillette, que le ressaut en question ne soit pas distinct sur le tracé du ventricule et se confonde insensiblement avec la ligne d'ascension de ce

(1) *Arch. ital. de biol.*, VIII, p. 127.

tracé. Hurthle (1) pense, contrairement à Fr. Franck (2), que quand la pression aortique est très basse, l'ondulation de l'oreillette peut se manifester jusque dans l'aorte. C'est, du reste, ce qu'avaient déjà constaté Chauveau et Marey.

Dans le ventricule, la période de brusque élévation de la courbe correspond au moment où les parois ventriculaires prennent leur point d'appui sur le liquide qu'elles contiennent et le compriment jusqu'à ce que la pression soit suffisante pour soulever les valvules sigmoïdes : cette pression passe alors par un maximum où elle se maintient, en présentant une période d'état qui se traduit par une ligne plus ou moins voisine de l'horizontale.

Le relâchement du ventricule est caractérisé par une descente rapide de la

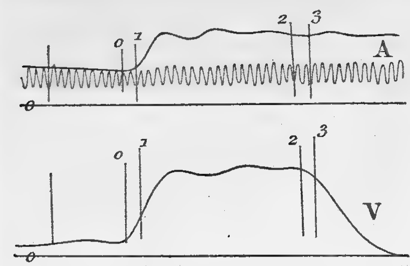


Fig. 295. — Pression ventriculaire V et pression aortique A (d'après Hurthle).

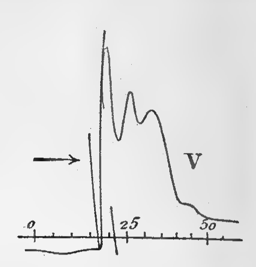


Fig. 296. — Pression prise dans le ventricule gauche (d'après Frédéricq).

courbe qui tombe même au-dessous de zéro; preuve de l'aspiration qui se produit à ce moment dans l'intérieur de la poche cardiaque (vide post-systolique de Marey). Enfin, une ligne obliquement ascendante indique la réplétion graduelle du ventricule par l'arrivée continuelle du sang de l'oreillette.

En résumé, le tracé de la pression intraventriculaire comprend une ascension brusque, puis un plateau plus ou moins parallèle à l'abscisse, une descente également brusque.

A cette courbe, Frey et Krehl (3) oppose celle qu'ils ont obtenue au moyen du tonomètre. On y voit surtout que la ligne d'ascension et la ligne de descente se continuent presque sans interruption par un sommet arrondi. Le plateau ne serait dû qu'à des défauts d'expérimentation ou au mode d'inscription de la courbe.

L'accord presque unanime des physiologistes, opérant avec les appareils les plus variés (voy. fig. 295 et 296), prouve, au contraire, que la courbe obtenue par Chauveau et Marey est bien la représentation fidèle des variations de la pression intraventriculaire. Frédéricq, Hurthle, Contejean ont en effet montré que le tonomètre de Frey est un instrument trop paresseux pour suivre les changements si rapides de cette pression.

D'ailleurs, une méthode fort simple dans laquelle la masse à mouvoir est réduite à son minimum, et qui de plus dispense de l'emploi d'un levier, a donné les mêmes résultats que les appareils enregistreurs : Bayliss et Starling

(1) *Arch. de Pfluger*, LIX, p. 56, 1891.
(2) *Arch. de physiol.*, 1890, p. 405.
(3) *Arch. f. Physiol.*, 1890, p. 42.

ont photographié les changements de volume de l'espace microscopique, rempli d'air, d'un tube de verre capillaire dont l'extrémité ouverte était introduite dans le ventricule gauche. Ils ont obtenu ainsi un plateau à trois ondulations qui se reproduit du reste sur le tracé aortique (1). Porter, au moyen du dispositif décrit plus haut, trouve également que le sommet de la courbe décrit une ligne presque parallèle à l'abscisse.

Enfin, Contejean, pour éviter l'emploi de tout instrument capable de fausser les indications, a recueilli sur le papier d'un appareil enregistreur le tracé hémautographique du ventricule gauche au moyen d'un trocart introduit

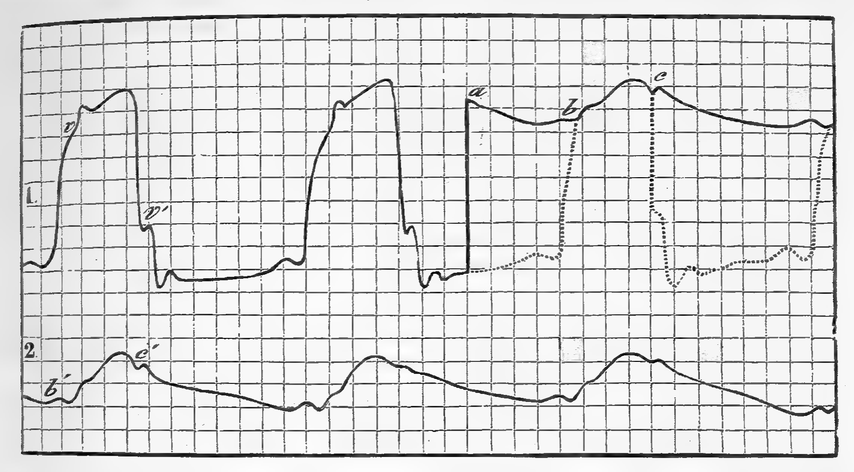


Fig. 297. — Tracés de la pression dans le ventricule gauche et dans l'aorte. Ligne 1, une sonde manométrique est dans le ventricule gauche. Après deux révolutions, on la fait passer dans l'aorte en *a*. — Ligne 2, tracé fourni par une autre sonde manométrique maintenue en permanence dans l'aorte (d'après Chauveau et Marey).

dans sa cavité. Le jet de sang figure nettement un plateau plus ou moins accidenté (2).

Le plateau présente plusieurs ondulations sur la signification desquelles on n'est pas d'accord. Chauveau et Marey les avaient d'abord attribuées à des vibrations des valvules auriculo-ventriculaires, puis plus tard Marey les considéra comme le retentissement sur le ventricule d'ondes venues des gros troncs artériels, pendant que la cavité des vaisseaux communique largement avec la cavité ventriculaire. Elles sont dues, pour Hurthle, à la collision du sang chassé par le cœur avec le sang contenu dans les artères; pour Roy et Adami, au défaut de synchronisme dans la contraction des différentes parties du ventricule; pour Frédéricq, Contejean, à des secousses incomplètement fusionnées. Pour Donders, Tigerstedt, elles n'auraient pas de signification physiologique, et résulteraient d'oscillations propres à l'appareil inscripteur : c'est aussi l'opinion de Porter, qui ne les retrouve pas sur son tracé.

Une question plus importante, c'est celle de savoir quel est le point précis

(1) *Journ. internat. d'anat. et de physiol.*, 1894, t. XI, p. 426.
(2) *Arch. de physiol.*, 1894, p. 816.

de la courbe ventriculaire qui correspond à la pénétration du sang dans l'aorte, quel est le moment où le cœur cesse de communiquer avec le système artériel, en d'autres termes de déterminer sur le tracé l'instant de l'ouverture et de la fermeture des valvules sigmoïdes. Il faut naturellement avoir recours, pour résoudre ce problème, à la comparaison des tracés du ventricule et de l'aorte. Chauveau et Marey (1) ont pu évaluer très exactement par ce procédé le temps employé par la systole pour triompher de la résistance opposée par la pression aortique (fig. 297).

Hurthle a construit un instrument spécial pour mesurer la différence de pression entre le ventricule et l'aorte, le manomètre différentiel (2).

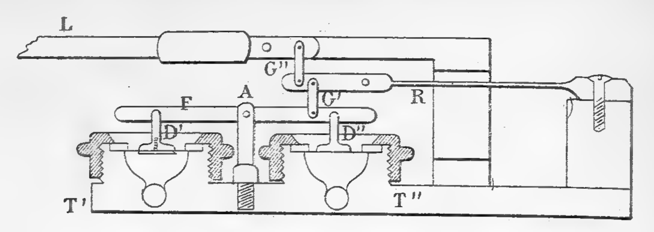


Fig. 298. — Manomètre différentiel de Hurthle.

Dans cet instrument (fig. 298), deux tambours T′ et T″, fermés par une mince membrane élastique, sont disposés de telle sorte que la pression agit par l'intermédiaire des disques centraux D′ D″ sur les bras du fléau F mobile autour de l'axe A; tant que la pression est égale dans les deux tambours, le fléau est horizontal, mais lorsque la pression devient plus grande dans un tambour que dans l'autre, le fléau abandonne sa position d'équilibre, agit par la

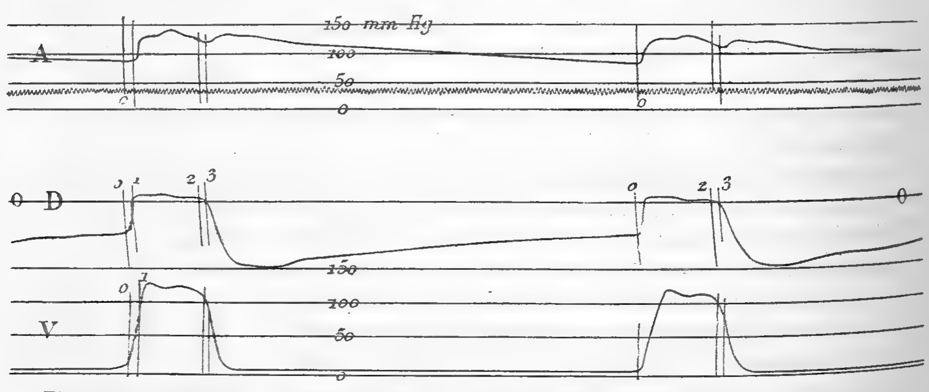


Fig. 299. — Tracés de la pression aortique A, de la pression ventriculaire V, du manomètre différentiel D (d'après Hurthle).

fourche G′ sur le ressort en acier R, dont le degré d'inflexion est enregistré à son tour par le levier inscripteur L. Une sonde double est introduite dans le cœur, de manière que l'extrémité d'un des conduits de la sonde se trouve

(1) Voy. Marey, *La circulation du sang*, 1881.
(2) *Arch. de Pfluger*, XLIX, p. 45.

dans le ventricule, l'extrémité de l'autre dans l'aorte, au-dessus des valvules ; chacun des conduits est mis en rapport au moyen d'un tube en V, d'une part avec un manomètre simple, d'autre part avec l'un des tambours du manomètre différentiel : on inscrit donc à la fois la courbe de pression du ventricule, celle de l'aorte et la courbe différentielle.

La figure obtenue de la sorte fournit des renseignements très instructifs (fig. 299).

L'abscisse 00 de la courbe différentielle D est la ligne décrite par le levier quand la pression est égale dans les deux tambours. A chaque révolution cardiaque, cette ligne est coupée deux fois par la courbe aux points 1 et 3. En ces deux points, par conséquent, la pression ventriculaire est égale à la pression aortique. En deçà de 1, elle tend de plus en plus à l'égaler ; au delà de 3, elle lui est devenue inférieure ; de 1 à 3, elle lui était supérieure.

Comparons maintenant la courbe différentielle à celle de la pression aortique A, d'une part, à celle de la pression ventriculaire V, d'autre part : on voit que ce n'est qu'immédiatement après que l'égalité de pression a été établie en 1 que la pression aortique commence à monter. Pendant ce temps, la pression ventriculaire s'est élevée de 0 à 1 et il est à remarquer que ce point 1 qui correspond à l'ouverture des valvules sigmoïdes ne passe pas par le sommet de la ligne d'ascension du tracé ventriculaire V, mais qu'il tombe un peu en avant de ce sommet.

Le manomètre différentiel permettra de même de déterminer le moment de l'occlusion des valvules sigmoïdes. Celle-ci devra se produire immédiatement après que la courbe différentielle aura coupé pour la deuxième fois l'abscisse en 3 : à partir de là, en effet, la pression ventriculaire est devenue inférieure à la pression aortique. On voit que le point qui correspond à l'abaissement des sigmoïdes tombe sur le tiers supérieur de la ligne de descente du tracé ventriculaire.

Frédéricq (1) est arrivé aux mêmes conclusions que Hurthle, en suivant un procédé déjà employé par Chauveau et Marey. Il introduit une sonde dans le ventricule gauche, puis, à un moment donné, il la retire dans l'aorte ; si on superpose les deux courbes obtenues, elles se coupent en deux points, dont le premier correspond à l'ouverture, le deuxième à la fermeture des valvules. Le schéma de Frédéricq (fig. 300) est tout à fait d'accord avec celui de Hurthle (fig. 299).

Rolleston, Frey, trouvent également que l'occlusion des valvules sigmoïdes tombe sur la partie supérieure de la ligne de descente. En la marquant sur l'extrémité inférieure de cette ligne, Chauveau et Marey, dans leur première interprétation, l'avaient donc fixée trop bas.

Récemment, d'ailleurs, Chauveau (2) est arrivé sur ce point à des résultats entièrement conformes à ceux qui viennent d'être exposés, par un procédé qui donne toute certitude ; il consiste à introduire chez le cheval, par la carotide, un explorateur électrique du mouvement des valvules sigmoïdes et à l'enregistrer en regard des tracés cardiographiques. « Une sonde métallique

(1) *Trav. du laborat.*, t. IV, 1892, p. 167.
(2) *C. R. de l'Acad. des sciences*, CXVIII, 1894, p. 686.

à double courant est munie de deux ampoules cardiographiques du type de l'ampoule ordinaire. Ces deux ampoules sont séparées par un espace de 3 centimètres environ. Leur disposition est telle que l'une peut être placée dans le ventricule gauche au-dessous des valvules sigmoïdes, l'autre restant dans l'aorte au-dessus de ces mêmes valvules. Alors l'étranglement qui sépare les deux orifices occupe le centre même de l'orifice aortique. Là, cette

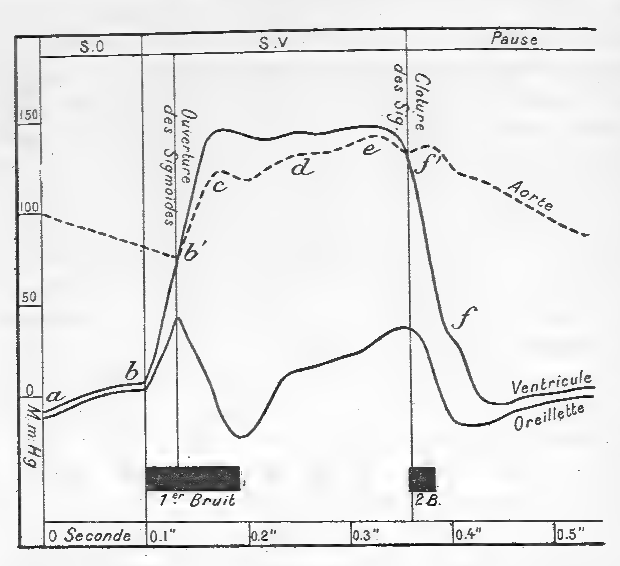


Fig. 300. — Tracés de la pression de l'oreillette gauche, du ventricule gauche, de l'aorte. — *ab*, systole de l'oreillette; *bcdef'*, systole du ventricule; *b'* et *f'*, ouverture et clôture des sigmoïdes artérielles (d'après Frédéricq).

partie de l'appareil est tantôt libre, tantôt serrée par les valvules, suivant que l'orifice est ouvert ou fermé. Sur cet étranglement, on a disposé un contact électrique qui s'établit ou se rompt par le jeu d'une étroite lame élastique faisant l'office d'un ressort très flexible, qu'actionne la pression des valvules. Si l'orifice aortique est béant, la lame se soulève et le contact est détruit. Si les valvules s'abaissent pour fermer l'orifice, le contact se rétablit. Le circuit électrique est formé par l'armature métallique de la sonde et par un fil isolé inclus dans la cavité externe de celle-ci. Ce fil est soudé à une petite plaque de platine également isolée, contre laquelle vient s'appuyer l'extrémité libre du ressort, garnie d'une petite pointe de platine. Des pinces extérieures servent à mettre dans le circuit une pile et un signal électro-magnétique qui marque toutes les ouvertures et toutes les fermetures du circuit déterminées par le jeu des valvules. »

La superposition des trois graphiques, celui de la pression ventriculaire, celui de la pulsation aortique, celui des mouvements des valvules, montre l'indice de la fermeture de l'orifice aortique en coïncidence : 1° dans le tracé ventriculaire, avec la région supérieure ou originelle de la brusque descente diastolique; 2° dans le tracé aortique, avec la région correspondante, acci-

dentée par le bref ressaut que provoque le choc des valvules sigmoïdes.

L'indice de l'ouverture de l'orifice aortique coïncide avec un point de la région supérieure de la partie ascendante du graphique ventriculaire.

D'après ce qui précède, on peut donc distinguer à la fonction ventriculaire différentes phases : 1° la phase de mise en tension ou d'énergie croissante [retard essentiel de Chauveau et Marey, période latente d'Edgren (1), période d'occlusion totale de Martius (2), intervalle présphygmique de Keyt (3), Anpannungszeit de Gad (4)], période pendant laquelle rien ne pénètre encore dans l'aorte ; 2° la phase d'évacuation, pendant laquelle, comme le montre le manomètre différentiel, la pression ventriculaire reste supérieure à la pression aortique : le plateau systolique peut d'ailleurs pendant ce temps se marquer par une ligne, soit obliquement ascendante, soit obliquement descendante, suivant que la pression aortique est forte ou faible (fig. 310) ; 3° la phase de relâchement. Bon nombre de physiologistes admettent avec Moens (5) et Baxt (6) qu'entre les deux dernières phases vient s'en intercaler une autre pendant laquelle le ventricule reste en contraction après avoir évacué son contenu (période de prolongation de la systole ou de contraction résiduelle, Verharrungszeit, rückständige Contraction). Hurthle trouve dans ses tracés la preuve que cette période n'existe pas (7) ; le relâchement succède sans intermédiaire à l'évacuation. Par contre, d'après les expériences récentes de Chauveau il faut encore distinguer un intervalle qui s'interpose entre la systole auriculaire et la systole ventriculaire, une période intersystolique (8).

La première phase de la systole ventriculaire, c'est-à-dire le retard de la pulsation aortique sur le début de la systole, est de 0,02 à 0,04′ chez le chien (Hurthle, Frédéricq), de 0,10″ chez le cheval (Chauveau et Marey). Il semble que plus la pression artérielle est forte, plus ce retard doive augmenter. Cependant, d'après Hurthle ce facteur n'aurait pas sur la durée du retard l'influence à laquelle on pourrait s'attendre. Pour des valeurs de la pression comprises entre 58 et 140^{mm} Hg, le retard n'oscillait qu'entre 0,022″ et 0,038″. En effet, la pression aortique ne donne pas la mesure exacte de l'effort ventriculaire pendant la période présphygmique. Il faudrait tenir compte aussi de la pression, également variable, qui règne dans le ventricule à la fin de la diastole, et de la différence entre cette pression et la pression aortique.

La durée de la période d'évacuation a varié dans les expériences de Hurthle de 0,178 à 0,185.

Après avoir étudié en détail le tracé du ventricule, il convient encore de dire quelques mots de la courbe de l'oreillette, qui a été particulièrement

(1) *Skand. Arch. f. Physiol.*, I, 1889, p. 67.
(2) Le ventricule étant fermé à ses deux orifices. — *Zeitschr. f. klin. Med.*, t. XIII, p. 327, 1888.
(3) *Sphymography and cardiography*. New York et London, 1887.
(4) Gad et Heymans, *Lehrb. de Physiol.*, 1892, p. 355.
(5) *Arch. de Pfluger*, 1879, Bd XX, p. 522.
(6) *Arch. f. Physiol.*, 1878, p. 122.
(7) Voy. cependant : Martius, *Zeitschr. f. klin. Med.* t. XIX, 1891. — V. Frey : *Die Unters. es Pulses*, 1893, p. 121.
(8) *Journ. de physiol. et de pathol. génér.*, 1899, p. 785 et 805.

étudiée par Chauveau et Marey et plus récemment par Frédéricq (1). Elle est intéressante en ce qu'elle montre les effets de l'aspiration systolique et diastolique sur le contenu de l'oreillette. Cette courbe comprend, en effet, d'après les tracés de Frédéricq (fig. 300) : 1° une première ondulation due à la systole de l'oreillette même *ab*; 2° une deuxième ondulation positive qui correspond exactement au début de la systole ventriculaire et que Frédéricq attribue à la projection des valvules auriculo-ventriculaires vers la cavité de l'oreillette; 3° une ondulation négative qui est souvent l'accident le plus marqué du tracé tout entier et qui est produite par l'abaissement du plancher auriculo-ventriculaire, et l'agrandissement de la cavité auriculaire. Le tracé s'élève ensuite par suite de l'accumulation du sang dans l'oreillette, jusqu'au moment où l'aspiration post-systolique produit une nouvelle dépression. Les éléments caractéristiques de cette courbe se retrouvent aussi sur certains graphiques du mémoire de Chauveau et Marey.

C. ***Valeur absolue de la pression dans les cavités cardiaques.*** — Les appareils cardiographiques de Chauveau et Marey, les sondes manométriques en général, peuvent donner non seulement le sens des changements de pression dans les cavités du cœur, mais encore leur valeur absolue; il suffit de les graduer préalablement au moyen du manomètre au mercure pris comme étalon. Pour lire avec plus de sûreté les indications fournies par la sonde cardiographique, Chauveau et Marey ont déterminé le moment où la pression tombe à zéro au moyen d'une sonde spéciale, la sonde à pression négative.

Goltz et Gaule (2), De Jäger (3), Hurthle (4), ont employé directement le manomètre à mercure; mais comme la colonne mercurielle n'aurait pas le temps, à cause des variations brusques de pression, d'atteindre, ni dans un sens ni dans l'autre, la position exacte qu'elle devrait prendre, ils ont transformé l'instrument en manomètre à maximum et à minimum par l'interposition d'une soupape sur le tube qui le relie à la sonde cardiaque. Suivant la direction que l'on donne à la soupape (fig. 301), le manomètre de Goltz et Gaule indique ou le minimum ou le maximum. Hurthle a construit un appareil qui donne à la fois l'un et l'autre.

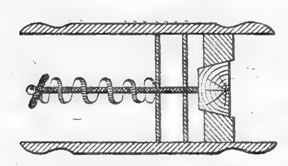


Fig. 301. — Soupape de Goltz et Gaule.

Trois expériences différentes faites sur le cheval ont fourni à Chauveau et Marey les résultats suivants :

	I.	II.	III.
Oreillette droite	2,5 mm. Hg.	»	»
Ventricule droit	24	30	29,0
Ventricule gauche	128	95	140

Ces chiffres ne représentent pas la valeur exacte de la pression normale chez le cheval, mais ils donnent une idée de la force relative des ventricules.

(1) *Trav. du laborat.*, t. II, 1888, p. 113.
(2) *Arch. de Pfluger*, XVII, p. 108, 1878.
(3) *Ibid.*, XXX, p. 506, 1883.
(4) *Arch. de Pfluger*, t. XLIII, p. 426.

De Jäger, dans trois expériences faites sur des chiens, a obtenu des chiffres plus élevés :

	I.	II.	III.
Ventricule gauche..........	234 mm. Hg.	174 mm.	176 mm.

et pour le ventricule droit chez trois autres chiens : 27, 38, 59^{mm} Hg. Fick (1) a trouvé une pression de 160^{mm} Hg dans le ventricule gauche. Dans l'oreillette droite, Goltz et Gaule, Magini ont trouvé 20^{mm} Hg.

La force du ventricule droit est à celle du ventricule gauche comme 1 : 3 (Chauveau et Marey), comme 1 : 2,5 (Goltz et Gaule), D'après les valeurs respectives de la pression dans l'artère pulmonaire et l'aorte, Beutner a obtenu comme moyenne chez deux chiens le rapport 1 : 3, chez cinq chats 1 : 5,3, chez quatre lapins 1 : 4,2.

On a déjà dit plus haut qu'immédiatement après la systole ventriculaire la pression devient négative dans le ventricule. Cette aspiration, déjà signalée par Chauveau et Marey, a été étudiée plus tard par Goltz et Gaule qui en ont démontré la véritable nature. Ces physiologistes ont prouvé, en effet, qu'elle n'était pas due au vide thoracique, puisqu'elle persiste encore après que le thorax a été ouvert. Elle est moins marquée, à la vérité, dans ce dernier cas, mais elle conserve encore une valeur relativement élevée. C'est ainsi que dans une expérience où elle était de — 52^{mm} Hg dans le ventricule gauche, le thorax étant intact, elle mesurait — 23^{mm} Hg après qu'il eut été ouvert, ce qui équivaut à environ 320^{mm} H^2O.

Goltz et Gaule avaient trouvé cette aspiration à peine indiquée dans le ventricule droit, 10 à 28^{mm} H^2O. Mais De Jäger a obtenu une pression négative de 5 à 38^{mm} Hg dans le ventricule droit; dans l'oreillette droite de 2 à 6^{mm}. Rolleston donne le chiffre de — 20^{mm} Hg, sans spécifier le ventricule auquel il appartient, mais il dit que l'aspiration existe dans les deux ventricules.

D'après Frey et Krehl, qui ont également confirmé la réalité de cette pression négative, elle peut manquer lorsque les pulsations sont fréquentes, parce qu'alors une seconde systole intervient avant que la pression n'ait eu le temps de retomber à zéro. Il peut encore en être de même avec un cœur ralenti, quand il s'est fait une telle accumulation de sang dans les veines et les oreillettes que l'abaissement des valvules auriculo-ventriculaires se produit et la réplétion des ventricules commence avant que la pression ne soit tombée à zéro (asphyxie, massage de l'abdomen).

Si l'aspiration post-systolique est incontestable, son interprétation n'est pas aisée. On a d'abord admis le fait avec difficulté, sous l'influence de l'idée que la diastole n'est qu'un phénomène purement passif. Des expériences déjà anciennes de L. Fick (2) avaient bien montré que si on plonge un cœur dans l'eau on peut, par des alternatives régulières de compression et de relâchement, y entretenir une véritable circulation. Mais on objectait que l'expé-

(1) *Ibid.*, XXX, p. 601.
(2) *Arch. f. Anat. u. Physiol.*, 1849, p. 283.

rience ne réussit que sur l'organe présentant déjà un certain degré de rigidité cadavérique.

Aussi l'opinion de Moens (1) fut-elle accueillie avec faveur quand il vint soutenir que cette pression négative était non pas diastolique, mais bien systolique : c'est la colonne de sang lancée avec une grande vitesse hors du ventricule qui créerait derrière elle cette aspiration. La preuve pour Moens que celle-ci se produit pendant la systole, c'est qu'elle ne se propage pas au contenu des veines caves et à celui des oreillettes, alors séparées du ventricule par l'occlusion des valvules auriculo-ventriculaires. Mais l'argument de Moens tombe à faux, comme on l'a vu, et d'ailleurs les indications manométriques et l'examen seul du tracé cardiographique suffisent à montrer que le vide est véritablement post-systolique. Quant à sa cause, elle est diversement expliquée. S'il n'y a pas à invoquer l'action de fibres dilatatrices spéciales, on peut cependant admettre que les propriétés élastiques du muscle cardiaque, que le mode de décontraction du cœur peuvent intervenir.

D'après Goltz et Gaule, les parois du cœur, après s'être resserrées, tendent à s'écarter avec une certaine force, pour reprendre la forme naturelle qu'elles doivent à leur élasticité. Ces physiologistes disent avoir réussi l'expérience de Fick sur des cœurs fraîchement extraits de la poitrine. De Jäger, Rolleston ont émis une opinion analogue. Gaule (2), Mink (3) pensent que la dilatation de la racine de l'aorte, et principalement la réplétion des sinus de Valsalva, peut immédiatement après la fermeture des valvules sigmoïdes distendre la base du cœur. Frey (4) invoque la décontraction successive des fibres longitudinales et circulaires. Enfin, il ne faut pas oublier que, s'il n'est pas vrai, comme l'a soutenu Brucke, que les artères du cœur se remplissent seulement pendant la diastole, cependant les couches profondes du myocarde, en raison de la compression qu'elles subissent, deviennent dans une certaine mesure imperméables au sang pendant la systole, ainsi que l'a montré Klug (5). La réplétion diastolique de ces vaisseaux profonds peut donc contribuer à la dilatation de la cavité cardiaque.

Chez les petits animaux, l'aspiration diastolique n'existe pas. Marey, qui a montré récemment le parti que l'on pouvait tirer de la chronophotographie pour étudier les mouvements du cœur, a constaté par ce procédé que chez la tortue le ventricule se remplit uniquement par la contraction de l'oreillette (6). D'autre part, l'indication du vide post-systolique fait défaut, comme on verra, sur le graphique de la pulsation du cœur de la grenouille.

(1) *Arch. de Pfluger*, XX, p. 580, 1879.
(2) *Centralbl. f. Physiol.*, 1890, p. 617.
(3) *Ibid.*, p. 569.
(4) *Die Unters. des Pulses*, p. 594.
(5) *Centralbl. f. med. Wissensch.*, 1876, p. 133.
(6) *C. R. de l'Acad. des sciences*, CXV, 1892, p. 485.

III. — SIGNES EXTÉRIEURS DE LA FONCTION DU CŒUR

Les mouvements du cœur se traduisent à l'extérieur par deux phénomènes de la plus haute importance : les bruits du cœur et le choc précordial.

A. ***Bruits du cœur. — Leur inscription.*** — L'oreille appliquée sur la poitrine d'un homme sain entend deux bruits pour chaque pulsation du cœur : la tête de l'observateur peut être légèrement soulevée en même temps qu'il entend le premier bruit, lequel coïncide donc avec le choc. Quand celui-ci n'est pas appréciable, on peut encore s'assurer que ce bruit correspond à la systole, parce qu'il est sensiblement synchrone au pouls carotidien ; le deuxième bruit arrive après un court instant, puis il se fait un nouveau silence plus long, et une nouvelle pulsation arrive accompagnée du premier bruit de la révolution nouvelle.

Le rythme est donc le suivant : premier bruit — petit silence — deuxième bruit — grand silence — premier bruit. — Le timbre des deux bruits n'est pas le même : le premier est sourd, grave ; le deuxième clair, bref, nettement frappé.

Le premier bruit est dû, au moins en partie, à la tension brusque des valvules auriculo-ventriculaires qui se produit au moment où le sang, comprimé dans les ventricules, tend à s'en échapper dans toutes les directions. Mais la contraction des fibres musculaires s'accompagne aussi, comme on sait, de vibrations sonores. Déjà les médecins du comité de Londres (1) avaient cherché dans le bruit musculaire un des éléments du premier bruit. Mais ce sont surtout les expériences de Ludwig et Dogiel (2) qui ont montré la part importante qui lui revient. Après avoir rendu un cœur complètement exsangue, ils l'ont détaché de la poitrine et l'ont introduit dans un entonnoir rempli de sang défibriné, dont l'extrémité inférieure était fermée par une membrane de caoutchouc, que l'on mettait en rapport avec un stéthoscope. L'auscultation permettait d'entendre un bruit qui ne différait pas sensiblement du bruit normal. Ludwig et Dogiel ont obtenu les mêmes résultats sur un cœur rendu exsangue *in situ* : de même, plus récemment, Yeo et Barrett (3).

Kasem-Beck (4), Krehl (5), ont continué à percevoir le premier bruit, alors qu'ils avaient fait baisser la pression artérielle, l'un par compression du sillon interauriculaire, l'autre par hémorragie artérielle, jusqu'à disparition du deuxième bruit ; la tension du sang était donc devenue incapable à ce moment de faire vibrer les valvules.

On a objecté que dans les expériences de Ludwig et Dogiel, et expériences analogues, la tension des valvules n'était pas complètement supprimée, qu'elle

(1) *Sixth Rep. of the British Assoc.*, 1836, p. 265.
(2) *Ber. üb. die Verhandl. d. sächs. Gesellschs. d. Wissensch*, 1868, p. 96.
(3) *Journ. of Phys.*, t. VI, 1885, p. 144.
(4) *Arch. de Pfluger*, XLVII, p. 56, 1890.
(5) *Arch. f. Physiol.*, 1889, p. 253.

pouvait être due à la seule contraction des muscles papillaires. Pour répondre à cet argument, Kasem-Beck a introduit au niveau de l'orifice auriculo-ventriculaire une sorte de spéculum en gutta-percha destiné à empêcher le jeu des valvules : le premier bruit n'en persistait pas moins. Krehl, au moyen d'un dispositif différent, a refait la même expérience avec le même résultat.

Cependant, il ne faudrait pas refuser à la vibration des valvules auriculo-ventriculaires toute part dans la production du premier bruit. En effet, Wintrich, en l'analysant au moyen d'un résonnateur, a trouvé qu'il se compose de deux sons, l'un plus grave, appartenant au muscle, l'autre, plus aigu, provenant de la tension des valvules. Haycraft a trouvé également que la tension des valvules a son importance, parce que le premier bruit est plus grave sur un cœur qui se contracte à vide, que dans les conditions normales (1). Enfin, Bayer et Giese entendaient un bruit bref et aigu, quand, pour tendre les valvules auriculo-ventriculaires, ils provoquaient une augmentation brusque de pression dans un cœur soumis à une circulation artificielle.

En attribuant au premier bruit du cœur une origine en partie musculaire, on s'est cependant heurté à une difficulté. La majorité des physiologistes considère la systole ventriculaire comme une secousse, alors que le bruit musculaire, le bruit rotatoire, est produit par les vibrations multiples du tétanos.

On a fait valoir que la brusque tension d'un muscle à structure aussi complexe que celle du cœur peut produire un bruit, ou bien que la contraction de ses différentes parties n'est pas synchrone. Un meilleur argument encore, c'est que d'après les expériences de Herroun et Yeo (2), de Mac Williams (3), de Bernstein (4), une secousse simple peut s'accompagner d'un bruit.

Bien que le premier bruit se produise sur toute la surface du ventricule, il s'entend cependant avec plus d'intensité au niveau de la pointe : cela tient au contact plus intime du ventricule avec la paroi thoracique en ce point, tandis que partout ailleurs le tissu du poumon s'interpose entre le cœur et la paroi.

L'ébranlement de la paroi thoracique pendant la pulsation, les vibrations des valvules sigmoïdes au moment où elles s'ouvrent devant la poussée ventriculaire, ne peuvent avoir qu'une part très restreinte dans la production du premier bruit, si toutefois il faut leur en reconnaître une.

Le mécanisme du deuxième bruit est des plus simples, et a été clairement établi par Rouanet : il est dû à la brusque tension des valvules sigmoïdes par le sang, au moment où, le ventricule se relâchant, le liquide tend à refluer des troncs artériels vers le ventricule. Une première preuve, c'est qu'il s'entend mieux au niveau de l'origine de l'aorte et de l'artère pulmonaire qu'en tout autre point. En opérant sur des tronçons aortiques munis de leurs valvules, et dans lesquels il refoulait du liquide, Rouanet a pu reproduire un

(1) *Journ. of Physiol.*, XI, p. 486, 1890.
(2) *Journ. of Physiol.*, VI, p. 290.
(3) *Centralbl. f. med. Wissensch.*, 1874.
(4) *Lehrb. d. Physiol.*, p. 345.

claquement sonore identique au deuxième bruit du cœur. D'autre part, les médecins des comités anglais, puis Chauveau et Faivre, ont montré qu'on le supprime lorsqu'on empêche les valvules sigmoïdes de se tendre, soit qu'on pince les troncs artériels à leur origine, soit que par des crochets ou des lames élastiques on maintienne ces replis appliqués contre la paroi des artères. On obtient le même résultat en excisant la pointe du cœur.

On considère généralement les bruits valvulaires comme des bruits solidiens, dus aux vibrations des valvules elles-mêmes. Talma (1) a cherché à démontrer qu'ils étaient au contraire engendrés exclusivement par les vibrations du liquide dans lequel ces replis baignent. Webster a trouvé qu'il fallait faire la part des unes et des autres (2).

Les deux cœurs étant synchrones, il en résulte que les bruits homologues de droite et de gauche se confondent : l'auscultation ne fait entendre que deux bruits pour chaque pulsation, alors qu'il s'en produit en réalité quatre. Dans certaines conditions, ces bruits se dédoublent, surtout le second : l'occlusion des valvules aortiques devance celle des valvules pulmonaires, par excès de pression dans l'aorte : ce phénomène se produirait surtout, d'après Potain, vers la fin de l'expiration et au commencement de l'inspiration. Le dédoublement normal du premier bruit a été également observé par Potain : il serait dû aussi au défaut de synchronisme des valvules auriculo-ventriculaires, et soumis à l'influence des mouvements respiratoires.

Du mécanisme même des bruits du cœur tel qu'il vient d'être exposé, il résulte qu'ils ne manifestent au dehors que l'action des ventricules ; le premier bruit correspond au début de la systole ventriculaire, le deuxième au début de la diastole. La contraction de l'oreillette est silencieuse. Cependant, en tant qu'organe musculaire, celle-ci aussi doit produire un bruit au moment de sa systole. De fait, Krehl (3) dit l'avoir perçu sur un cœur mis à nu, les ventricules étant arrêtés, et il pense qu'il s'entend probablement aussi dans les conditions normales, mais confondu avec le premier bruit. Dans certains cas, les deux sons pourraient devenir distincts, le premier bruit serait alors dédoublé. Hurthle a soutenu une opinion analogue (4).

Dans ces derniers temps, on est arrivé à réaliser, au moyen du microphone, l'inscription automatique des bruits du cœur. Hurthle (5), qui est le premier entré dans cette voie, a indiqué deux procédés qui répondent au but. L'un peut se résumer ainsi (fig. 302 et 303) : un tube stéthoscopique, appliqué sur un point du thorax où il ne peut être ébranlé par le choc du cœur, transmet les vibrations sonores aux charbons du microphone M par l'intermédiaire d'une mince membrane conique C et d'une petite baguette de bois B, disposition qui imite celle de la membrane du tympan avec le marteau. Les variations d'intensité du courant dans le circuit primaire $S_M PJ_1$, dont font partie les charbons du stéthoscope-microphone S_M, induisent dans une bobine secon-

(1) *Arch. de Pfluger*, t. XXIII, p. 275, 1880.
(2) *Journ. of Physiol.*, p. 294, 1882.
(3) *Arch. f. Physiol.*, 1889, p. 253.
(4) *Arch. de Pfluger*, t. LX, 1895, p. 284.
(5) *Ibid.*, t. LX, 1895, p. 263.

daire J_{II} des courants qui excitent un muscle gastrocnémien de grenouille G dont la contraction est inscrite sur un cylindre par $C_{II}T_{II}$, en même temps que

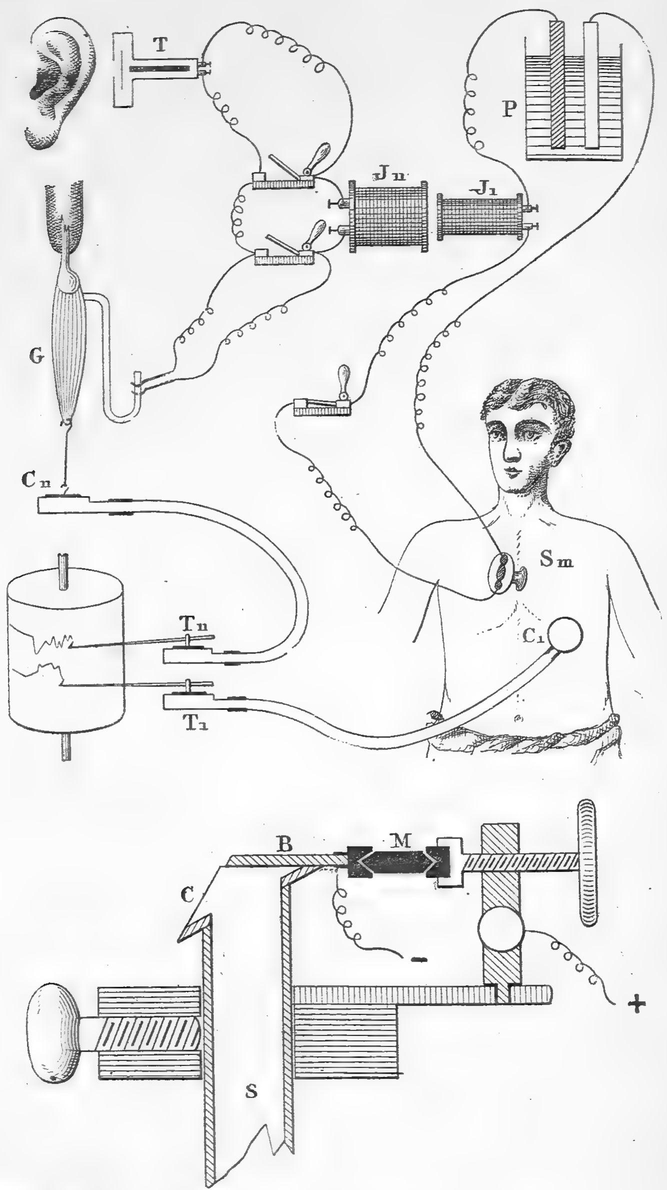


Fig. 302 et 303. — Dispositif de Hurthle pour l'inscription des bruits du cœur ; S, le stéthoscope-microphone.

le cardiogramme du sujet en expérience s'enregistre par $C_{I}T_{I}$. Les courants induits peuvent aussi être conduits au téléphone T.

Plus tard, Hurthle a construit un microphone plus perfectionné. S'étant assuré que la tige d'un diapason en bois vibre parfaitement à l'unisson des sons transmis, il a fixé les contacts du microphone (charbon et argent) sur les deux branches d'un diapason de ce genre. Entre la tige de l'instrument et la paroi thoracique, on interpose un appareil destiné à renforcer le son (cône creux de bois dans lequel une série de disques minces en sapin sont superposés et fixés sur une tige de bois cylindrique qui les traverse en leur centre).

Les variations du courant produites par les ébranlements des contacts du microphone servent à exciter un électro-aimant. En face de ce dernier est disposé un tambour à air fermé par une membrane élastique épaisse et fortement tendue, sur laquelle est fixée une lame de fer actionnée par l'électro-aimant : les variations de pression dans la capsule sont inscrites par un tambour enregistreur. On peut aussi faire agir le microphone sur un téléphone.

La figure 304 représente la disposition générale de l'appareil. B est la batterie formée par trois éléments de Daniel, M le microphone, C_I une clef

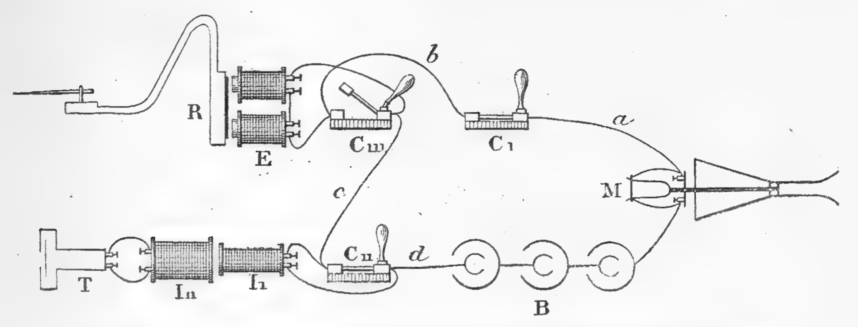


Fig. 304. — Autre appareil de Hurthle pour l'inscription des bruits du cœur.

simple, C_{II} et C_{III} deux leviers-clefs de Du Bois-Reymond, J_I et J_{II} et T l'appareil inducteur avec le téléphone, E l'électro-aimant, avec R l'appareil inscripteur. C_I permet d'ouvrir et de fermer le circuit de la batterie qui ne passe que par les fils *abcde* tant que les clefs C_{II} et C_{III} sont baissées ; en ouvrant C_{II}, on actionne le téléphone ; en ouvrant C_{III}, on intercale l'électro-aimant.

Einthoven et Geluk (1) font agir le microphone par l'intermédiaire de courants induits sur un électromètre capillaire dont ils ont photographié les oscillations.

Holowinski (2) a photographié les bruits du cœur par un autre procédé. Un microphone appliqué sur la surface du thorax excite un téléphone, dit téléphone optique. Le diaphragme du téléphone porte à son centre une fine aiguille terminée par un chapeau que l'on colle sur la surface (vernie en noir) d'une mince lamelle de verre ($0^{mm},1$). Cette lamelle acquiert ainsi une courbure convexe et est placée, à petite distance, sous une autre lame

(1) *Arch. de Pfluger*, t. LVII, p. 617, 1894.
(2) *Arch. de physiol.*, 1896, p. 893.

plus épaisse. La couche d'air comprise entre les deux lames forme par interférence les anneaux colorés, dits de Newton, dont les diamètres se contractent ou se dilatent sous l'influence des déplacements du diaphragme du téléphone. Celui-ci est placé à 45° par rapport à la lumière incidente d'une lampe à magnésium, qui traverse d'abord deux verres violets, éclaire ensuite les anneaux dont l'image (agrandie 4,5 fois) est projetée sur la partie inférieure d'une fente verticale derrière laquelle se meut une bande de papier sensible.

L'inscription des bruits du cœur n'a véritablement d'intérêt que si elle se fait en regard du graphique de la pulsation ; aussi l'exposé des résultats obtenus sera-t-il mieux placé dans le paragraphe qui va suivre.

B. ***Pulsation ou choc du cœur. — Son inscription. — Cardiogramme.*** — 1° La main appliquée sur la paroi thoracique au niveau du cinquième espace intercostal chez l'homme, un peu en dedans de la ligne mamillaire, sent un ébranlement plus ou moins violent, que l'on a nommé choc précordial ou pulsation du cœur. Harvey avait déjà constaté que le phénomène est synchrone à la systole du ventricule ; Chauveau et Marey en ont fourni la démonstration péremptoire par la méthode graphique, à l'encontre d'opinions erronées qui avaient encore cours à l'époque où ils ont exécuté leurs recherches.

La véritable cause du choc précordial doit être cherchée dans le changement de forme et de consistance que subissent les ventricules pendant leur contraction (Chauveau et Faivre, Chauveau et Marey). Au moment où ils durcissent, ils tendent subitement, comme il a été dit, à prendre une forme définie, la forme globuleuse, et exercent sur la paroi thoracique contre laquelle ils sont appliqués une pression énergique, de même qu'ils repousseraient brusquement un poids plus ou moins lourd dont on les aurait chargés. Aussi, sur un cœur mis à découvert, la pulsation se sent également bien, quelle que soit la région que l'on explore. Ce serait donc une erreur de croire que le ventricule vient alternativement se rapprocher de la paroi pendant la systole, et s'en éloigner pendant la diastole : il est sans cesse en contact avec elle.

A cela il faut ajouter encore que le redressement de l'axe longitudinal (fig. 290) du cœur tend à enfoncer en quelque sorte la pointe dans la paroi (Ludwig).

D'autres théories ont été émises sur le mécanisme du choc précordial. Toutes celles qui invoquent, soit le recul, soit les différents mouvements imprimés à l'organe par les changements de courbure des gros troncs artériels, par leur élongation systolique, etc., sont réfutées par l'expérience suivante de Chauveau et Faivre : si on lie les orifices veineux du cœur ou si on pince les troncs artériels à leur origine, on ne supprime pas la pulsation.

Landois a fait remarquer de son côté que la pénétration du sang dans les artères ne se fait que quelques centièmes de seconde après le début de la systole et du choc précordial (1).

Il n'est pas à dire pour cela que ces diverses circonstances, en particulier

(1) Landois, *Traité de physiol. hum.*, édit. franç., 1893, p. 89.

le mouvement de rotation du cœur, ne puissent intervenir dans la production du choc ; mais elles n'ont que peu d'importance.

Marey a construit des appareils schématiques qui permettent de reproduire le mécanisme essentiel de la pulsation.

2° L'inscription du choc du cœur est le seul moyen dont on dispose pour étudier avec quelque détail chez l'homme les mouvements du cœur : on comprend l'intérêt qui s'attache à l'interprétation de la courbe qu'elle fournit.

L'appareil habituellement employé chez l'homme est l'explorateur du cœur de Marey : à l'intérieur d'une cloche de bois ou de métal se trouve une capsule de métal qui s'ouvre au dehors par un tube traversant les parois de la

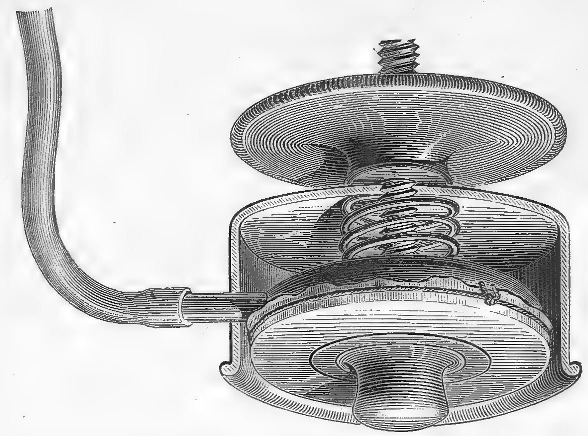


Fig. 305. — Cardiographe de Marey pour l'exploration du choc du cœur chez l'homme.

cloche et relié à un tambour à levier (fig. 305). La capsule, fermée en bas par une membrane de caoutchouc, renferme un ressort boudin assez faible qui fait légèrement saillir la membrane. Sur celle-ci repose un disque d'aluminium avec un bouton. Toute pression exercée sur ce bouton chasse l'air de la capsule, à travers le tube qui la termine, jusque dans les appareils inscripteurs. Une vis de réglage placée au fond de la cloche permet d'exercer sur le point que l'on explore une pression plus ou moins forte.

L'explorateur à deux tambours de Marey est destiné à inscrire le choc du cœur chez les petits animaux (1) en même temps que les mouvements respiratoires (fig. 306). On a décrit un grand nombre d'autres cardiographes construits sur le modèle de ceux de Marey.

Chez les animaux, on s'est servi de leviers de forme diverse reposant sans intermédiaire sur le cœur et inscrivant directement sur le papier enregistreur (Baxt, Frey, etc.), de tiges ou de leviers actionnant un tambour manipulateur [Fr. Franck (2), Laulanié (3)]. Hurthle a employé comme appareil

(1) Voy. aussi Bardier, *Arch. de physiol.*, 1897, p. 705.
(2) *Arch. de physiol.*, 1891, p. 762.
(3) *C. R. de la Soc. de biol.*, 1889, p. 682.

récepteur une tige creuse terminée par une très petite ampoule élastique qui était mise en contact avec le cœur par une ouverture faite à la paroi thoracique. Le mouvement était transmis à un tambour à levier de petit modèle, le tout étant rempli de liquide (1).

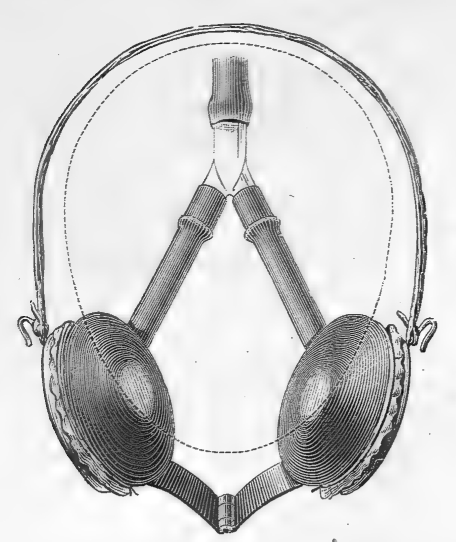


Fig. 306. — Explorateur à deux tambours de Marey pour enregistrer le choc du cœur chez les petits mammifères.

En Allemagne, en Angleterre, on tend généralement à réserver aujourd'hui le nom de cardiographes proprement dits aux appareils dont il est ici question, et cardiogramme est devenu synonyme de tracé du choc du cœur.

3° Le cardiogramme enregistré dans de bonnes conditions présente des caractères qui rappellent en tous points ceux de la pression intraventriculaire : une ondulation pour la systole de l'oreillette (2), une ascension brusque, un plateau plus ou moins ondulé, une descente plus ou moins rapide avec l'encoche finale du vide post-systolique: la réplétion diastolique se marque également par une ascension graduelle de la courbe.

On doit donc pouvoir y lire l'instant précis où débute la systole du ventricule, et celui où la diastole commence : y mesurer les durées relatives des périodes systolique et diastolique du ventricule : y lire également les clôtures valvulaires.

Pour Chauveau et Marey, en effet, le tracé du choc du cœur fournit l'expression des changements de consistance du ventricule et par suite celle des changements de la pression intraventriculaire, mais modifiée par l'expression des changements de volume. L'influence de ce dernier facteur se manifeste par une descente plus ou moins inclinée du tracé de la pulsation à partir de son sommet, bien qu'à ce moment la pression intraventriculaire reste encore élevée et subisse même un accroissement notable (fig. 294, P) ; en effet, le ventricule ne peut exercer une pression toujours égale contre les parois thoraciques pendant toute la durée de la systole, parce qu'il diminue graduellement de volume en se vidant.

Il est même des cas dans lesquels cette différence dans l'aspect général des deux tracés n'existe pas, où la ressemblance est complète, et où le cardiogramme a la forme trapézoïde de la courbe de pression intraventriculaire.

Néanmoins, la valeur et la signification du cardiogramme ont été fortement mises en discussion. Ainsi Roy et Adami sont arrivés à cette conclusion

(1) *Arch. de Pfluger*, t. XLIX, 1891, p. 42.

(2) Cependant, comme l'a montré Chauveau, la pulsation auriculaire du cardiogramme n'est pas un phénomène nécessaire. (*Journ. de physiol. et de pathol. gén.*, 1899, p. 797.)

décourageante qu'il est difficile et même impossible dans la plupart des cas de mesurer avec exactitude la durée des différentes phases du cycle cardiaque en s'en tenant uniquement aux tracés du choc du cœur. La forme du cardiogramme varie en effet avec la pression exercée par l'appareil récepteur ; plus celle-ci est faible, plus le plateau systolique s'allonge, comme le montre la figure 307, dans laquelle de I à III cette pression décroît.

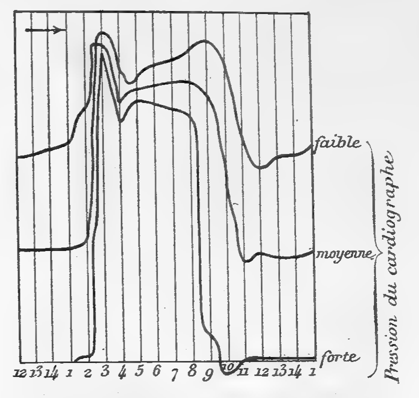


Fig. 307. — Modifications du tracé du choc du cœur chez le chien sous l'influence des variations de la pression exercée par le cardiographe sur la paroi ventriculaire (d'après Roy et Adami).

Pour Martius (1), la courbe de pression intraventriculaire et celle du tracé cardiographique n'ont rien de commun : elles se produisent par un mécanisme tout différent : « leur comparaison n'a guère de sens et ne peut conduire qu'à des conceptions erronées ». Mais c'est surtout Frey (2) qui a cherché à prouver que le cardiogramme n'est ni une courbe de pression, ni une courbe de volume, mais une courbe de secousse musculaire modifiée par les changements de forme et de situation des différentes parties du cœur. Engelmann partage, en principe, la même opinion (3). Il faut reconnaître que, s'il en est ainsi, la physionomie de la secousse est singulièrement influencée par la présence ou l'absence du sang dans l'intérieur des cavités cardiaques, comme l'atteste l'examen comparatif des courbes publiées par Frey lui-même. Les tracés de Meyer (4), de Laulanié (5), peuvent aussi servir à montrer à quel point les systoles à vide diffèrent des systoles normales.

Quoi qu'il en soit de la théorie de la courbe cardiographique, les expériences de Chauveau et Marey avaient déjà bien établi qu'elle fournit l'expression des principaux actes qui se passent dans une révolution du cœur. Elles ont été pleinement confirmées par celles de Frédéricq et de Hurthle. Sur les tracés publiés par ce dernier, on peut constater que les deux courbes montent en même temps, présentent un plateau systolique semblable et redescendent ensemble. « L'effort de pression, dit ce physiologiste, que la surface du cœur exerce contre la paroi thoracique et qui produit la portion systolique du cardiogramme parcourt les mêmes phases que les variations de pression à l'intérieur du ventricule (fig. 308), et nous pouvons en tirer la conclusion que les deux courbes ont la même cause efficiente, c'est-à-dire la contraction du muscle ventriculaire et que le cardiogramme peut servir à fixer la durée de la systole du ventricule. »

(1) *Zeitschr. f. klin. Med.*, XIX, 1891, p. 109.
(2) *Die Untersuch. des Pulses*, 1892.
(3) *Arch. de Pfluger*, t. LII, 1892, p. 363.
(4) *Arch. de physiol.*, 1892, p. 670.
(5) *Soc. de biol.*, 1892, p. 557.

Frédéricq trouve de même que les plumes des deux enregistreurs, sonde cardiaque droite, explorateur du choc du cœur, montent et descendent en même temps, « comme si elles étaient liées par un fil invisible ».

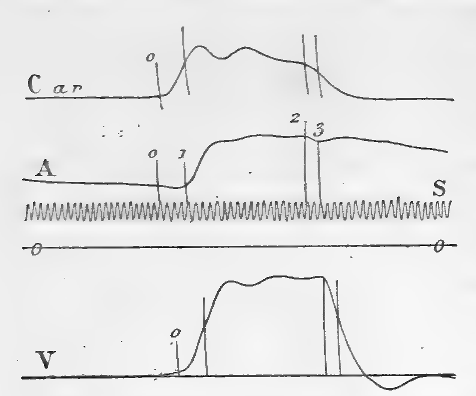


Fig. 308. — Tracés du choc du cœur *Car*, de la pression aortique A, de la pression ventriculaire V (d'après Hurthle).

Les deux physiologistes reconnaissent d'ailleurs que dans beaucoup de cas le cardiogramme présente une forme atypique. « Mais il est toujours possible sur les chiens maigres, couchés sur le côté ou sur le ventre, de recueillir à certains endroits de la paroi thoracique droite des tracés cardiographiques trapéziformes identiques à la pression intraventriculaire. » (Frédéricq) (1).

L'identité des deux courbes étant admise, on pourra donc aussi fixer sur l'une, comme on a fait sur l'autre, les points qui correspondent à l'ouverture et à la fermeture des valvules sigmoïdes. Comme les principales phases de l'activité du cœur ont été nettement délimitées sur le graphique de la pression intraventriculaire par les méthodes étudiées précédemment, il suffira d'inscrire en face de lui le cardiogramme pour établir la concordance. C'est ce qui a été fait sur la figure schématique 309 où la pression aortique a dû également trouver place. Des quatre lignes verticales qui se succèdent de gauche à droite, la première indique le début de la systole ventriculaire, la deuxième l'ouverture de l'orifice aortique, la troisième le début du relâchement du ventricule et la quatrième correspond sur le tracé aortique à l'ondulation dicrote. Par conséquent, la clôture des valvules sigmoïdes doit avoir lieu entre les lignes III et IV, puisqu'elle est la conséquence immédiate du relâchement du ventricule, et la cause de la production de l'onde dicrote. Le temps est marqué en dixièmes de seconde. (Les lignes pointillées et pleines du tracé ventriculaire correspondent respectivement à une pression artérielle forte et faible.)

En résumé, l'orifice aortique s'ouvre avant que la ligne d'ascension ne soit arrivée à son sommet, et se ferme en un point qui correspond à la partie supérieure de la ligne de descente du cardiogramme. Les points correspondants se marquent quelquefois par une petite dépression. De cette figure schématique, il est intéressant de rapprocher le magnifique graphique publié par Chauveau et recueilli directement sur l'animal (fig. 310). La pulsation cardiaque y est inscrite avec tous les phénomènes extérieurs et intérieurs qui l'accompagnent et la mécanique cardiaque presque tout entière s'y trouve en quelque sorte résumé.

4° Ce qui précède s'applique à l'inscription du cardiogramme chez l'animal.

(1) Art. Cardiographie du *Dictionnaire de physiologie* de Ch. Richet.

Mais quand il s'agit de faire les mêmes déterminations chez l'homme, on n'a plus la ressource de la comparaison avec le tracé de la pression intraventriculaire. L'on dispose heureusement de deux autres méthodes : elles consistent à établir les rapports du cardiogramme, soit avec les bruits du cœur, soit avec la pulsation d'une artère, la carotide de préférence.

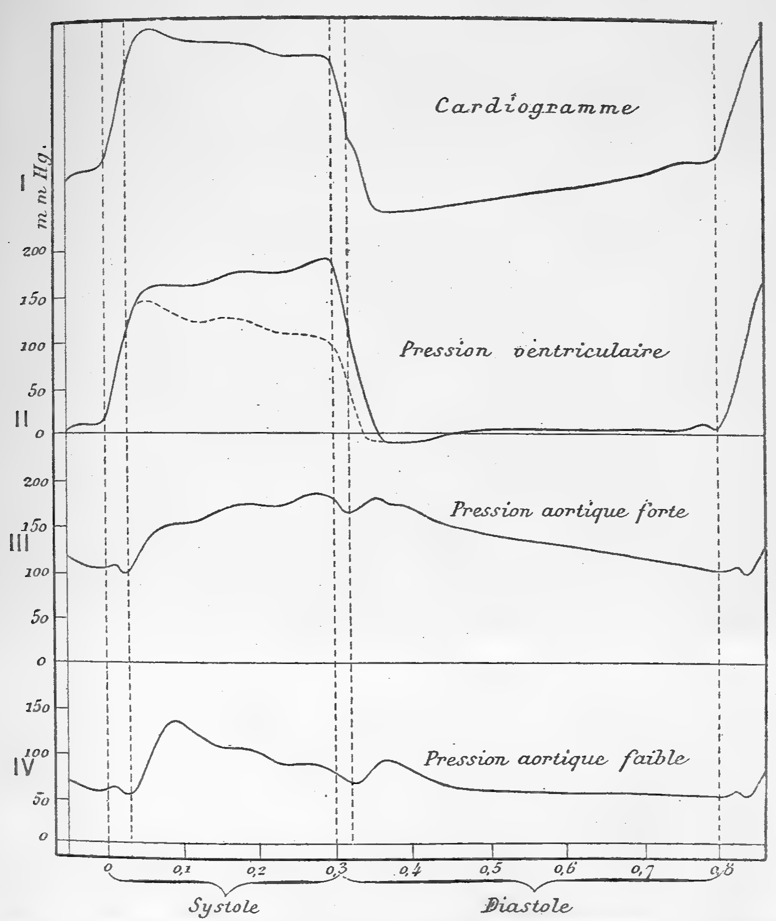


Fig. 309. — Tracés comparatifs du choc du cœur, de la pression ventriculaire, de la pression aortique ; schéma (d'après Hurthle).

La première de ces deux méthodes a été d'abord employée par Marey qui l'a appliquée à l'étude du cardiogramme du cheval. Auscultant le cœur de cet animal, il notait, au moyen d'un signal, en regard du tracé du choc, le moment où il entendait chacun des bruits (1). Il a été suivi dans cette voie

(1) *Journal de l'anat.*, t. II, p. 286, 1865. — *La Circulation du sang*, 1881.

par Martius (1), Frédéricq (2), Edgren (3). Mais ces expérimentateurs se sont surtout attachés à déterminer, chez l'homme, le moment précis de la pro-

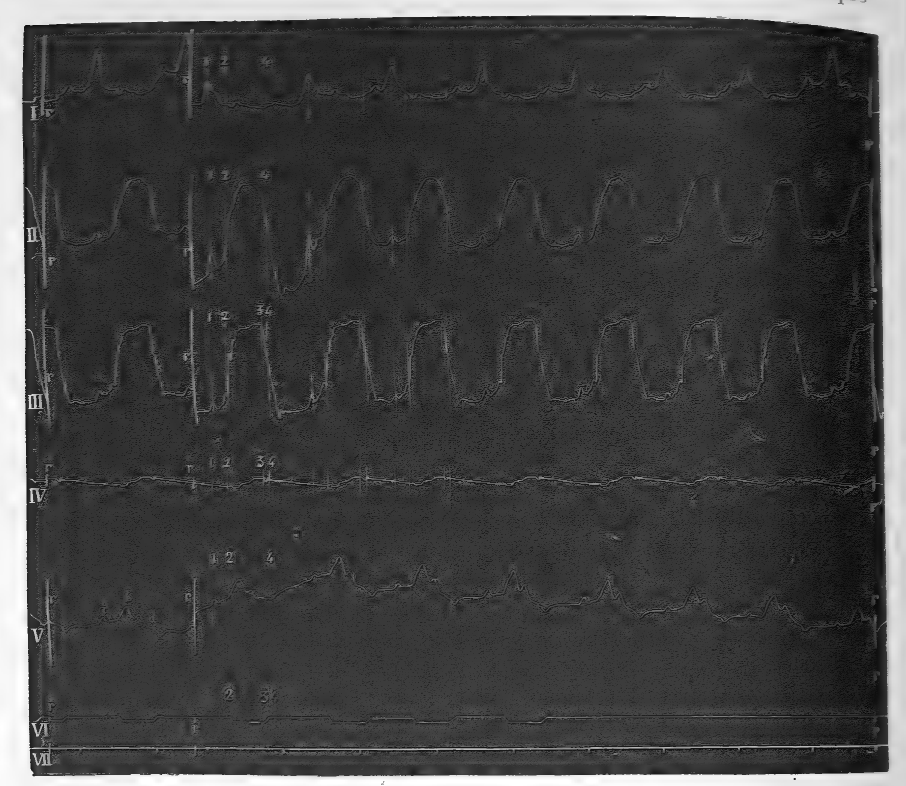


Fig. 310. — Cardiographie typique sur un sujet en état physiologique.

I, *pression intérieure de l'oreillette droite.* — II, *pression intérieure du ventricule droit.* — III, *pression intérieure du ventricule gauche.* — IV, *pression intra-aortique.* — V, *pulsation cardiaque extérieure.* — VI, *Notation des bruits du cœur.* — VII, *Chronographe* (1/2 seconde). — *r*, etc., repères naturels ; 1, 2, 3, 4, repères surajoutés : 1, repère répondant au sommet de la systole auriculaire ; 2, repère répondant au début de la systole ventriculaire ; 3, repère répondant à la fin de la systole ventriculaire ; 4, repère répondant au ressaut du début de la diastole ventriculaire.

(Cette figure n'est pas de grandeur naturelle. Elle a subi une réduction photographique. C'est la reproduction absolument fidèle de l'original, sauf pour un point, les indications chronographiques, qui ont été refaites artificiellement tout près de la ligne de notation du bruit, pour gagner de la place. La division du temps est ici régulière. Elle ne l'était pas tout à fait dans le graphique original, parce qu'un accident survenu à l'appareil enregistreur avait rendu un peu inégale la vitesse d'entraînement du papier noirci sous les pointes écrivantes dans la période de l'expérience répondant à cette partie de la feuille de graphiques.)

duction du second bruit, c'est-à-dire de la fermeture des valvules sigmoïdes, puisqu'il est admis (quoique cela ne soit pas toujours exact) que le premier

(1) *Zeitschr. f. klin. Med.*, t. XV, p. 536, 1889 ; t. XIII, p. 327, 1888.

(2) *Trav. du laborat.*, t. II, 1888. — *Centralbl. f. Physiol.*, 1888, p. 127 ; 1891, p. 582.

(3) *Loc. cit.*

bruit correspond au début même de la ligne d'ascension. Le cardiographe stéthoscope d'Edgren permet d'ailleurs d'inscrire le tracé du choc du cœur tout en pratiquant l'auscultation. Le stéthoscope à transmission aérienne de Chauveau présente le même avantage (1).

A cette méthode on peut objecter que les estimations faites au moyen de signaux sont passibles d'une cause d'erreur, à savoir que nous ne signalons l'instant où un phénomène se produit qu'avec un certain retard. Le retard, qui pour les bruits faibles peut être de 0,10 à 0,15″, varie non seulement d'un observateur à l'autre, mais chez le même observateur pour des déterminations successives. Cependant Martius, Byron Bramwell et Murray (2) ont montré que quand un bruit se produit avec une périodicité régulière, on arrive à le signaler non au moment où il vient d'être entendu, mais au moment où l'on s'attend à sa production. Dans les mouvements de ce genre, comme l'a fait remarquer Kraepelin (3), l'observateur s'appuie sur une estimation involontaire du temps, pour rendre synchrone l'impression attendue et le mouvement volontaire qui doit la signaler.

Il n'est pas moins vrai que le procédé a donné des résultats variables suivant les expérimentateurs ; il en est de même de celui qui a été employé par Frédéricq et par Edgren et qui consiste à ausculter le cœur tout en suivant de l'œil les mouvements de la plume du cardiographe.

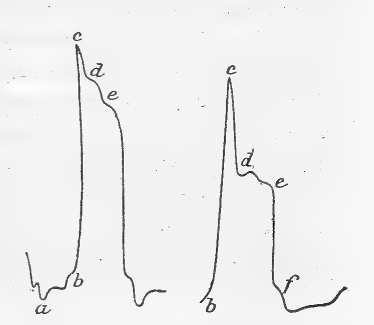


Fig. 311. — Tracés du choc du cœur de l'homme (d'après Maurer, emprunté à Frédéricq).

Cependant Frédéricq, Martius (4) et Edgren s'accordent sur ce point que l'indice du deuxième bruit tombe sur la ligne de descente du cardiogramme, alors que Landois et bon nombre de cliniciens allemands avaient soutenu qu'il s'entendait pendant l'inscription du plateau systolique du cardiogramme. Ainsi, d'après Landois, la première ondulation du plateau (*c*) correspond seule à la systole du ventricule (fig. 311), tandis que les deux suivantes *d* et *e* sont dues l'une à la clôture des sigmoïdes aortiques, l'autre à celle des sigmoïdes pulmonaires. Pour Frédéricq et Martius, c'est au point *e* qu'il faut noter le deuxième bruit; pour Edgren, c'est au point *f*.

L'inscription automatique des bruits du cœur en regard du cardiogramme, au moyen des microphones déjà décrits, a permis de trancher le différend. Chez l'homme, comme chez l'animal, c'est dans la première moitié de la ligne de descente, un peu au-dessous du point où cesse le plateau systolique, que s'enregistre le deuxième bruit, aussi bien dans la méthode de Hurthle que

(1) *C. R. de la Soc. de biol.*, 1896, p. 410.
(2) *Brit. med. Journ.*, 1888, I, p. 10.
(3) *Deutsche med. Wochenschr.*, 1888, p. 669.
(4) C'est du moins ce que Martius reconnaît dans son dernier travail : *Zeitschr. f. klin. Med.*, 1891, p. 108.

dans celle d'Einthoven et Geluk (1). C'est donc bien en ce point que commence le relâchement du ventricule.

Mais en ce qui concerne le premier bruit, les résultats obtenus par Hurthle ne cadrent pas entièrement avec l'opinion reçue. Chez l'homme, les cas où le premier bruit s'inscrit bien en regard du début même de la ligne d'ascension, sont les plus rares. Les plus habituels sont ceux où il coïncide avec une encoche que présente à peu près en son milieu la ligne d'ascension. Hurthle admet que la première moitié de la ligne correspond à la systole auriculaire et que l'encoche en question marque le début de la systole ventriculaire. Enfin, dans une troisième catégorie de tracés où cette encoche existe, le premier bruit s'inscrit néanmoins déjà en regard du début de la ligne d'ascension, c'est-à-dire en regard de la systole auriculaire qui dans ce cas serait donc sonore. Il est à remarquer que Einthoven et Geluk ont de même noté que l'indice du premier bruit précède d'un très court instant l'ascension du cardiogramme.

Le type le plus fréquent des tracés enregistrés par Hurthle semble, dans une certaine mesure, en désaccord avec la loi posée par Chauveau que « jamais la pulsation auriculaire ne se confond avec la pulsation cardiaque vraie », que « le battement auriculaire (contraction et relâchement) est un phénomène indépendant complètement terminé, quand débute le battement ventriculaire » (2). Mais la contradiction est plus apparente que réelle, puisqu'au moment où sur le tracé de Hurthle le premier bruit s'inscrit en face de l'encoche, la systole auriculaire est, en tout cas, terminée. D'autre part, il y a lieu de se demander si l'incisure en question ne répond pas à la fin de la période intersystolique de Chauveau.

Une deuxième méthode peut être employée chez l'homme pour déchiffrer le cardiogramme : c'est sa comparaison avec le tracé du pouls carotidien. L'onde dicrote correspond en effet sensiblement à la clôture des valvules sigmoïdes. Si l'on inscrit donc en face l'une de l'autre la pulsation du cœur et celle de l'artère, on pourra facilement, en tenant compte du temps nécessaire à la propagation de l'onde dicrote depuis la racine de l'aorte jusqu'au point considéré, repérer sur le cardiogramme le point correspondant à cette ondulation, c'est-à-dire à l'occlusion des sigmoïdes. Nous trouvons, par exemple, que l'onde dicrote de la pulsation artérielle retarde de 0,08″ sur le début de la ligne de descente du cardiogramme. La distance de la carotide à l'origine de l'aorte est, je suppose, d'environ 25 centimètres dans le cas considéré, et la vitesse de l'onde dicrote de 6 mètres par seconde : il aura donc fallu 0,04″ à l'onde dicrote pour se propager jusqu'au point exploré ; par conséquent, sur le tracé du cardiogramme, l'indice de clôture des sigmoïdes devra être séparé de l'origine de la ligne de descente par un intervalle qui correspond à $0{,}08'' - 0{,}04'' = 0{,}04''$. Hurthle est arrivé de la sorte à des résultats conformes à ceux fournis par les autres méthodes; il faut donc s'y attacher de préférence, bien qu'Edgren, d'après le même procédé, fixe l'oc-

(1) Cependant Holowinski en revient à l'opinion de Landois.
(2) *Journ. de physiol.* et *de pathol. gén.*, 1899, p. 805.

clusion des valvules à la partie inférieure de la ligne de descente, en *f*.

Cette méthode est également précieuse en ce qu'elle permet de déterminer chez l'homme le temps qui s'écoule entre le début de la systole et la pénétration du sang dans l'aorte. Il sera en effet égal au retard de la pulsation carotidienne sur la pulsation cardiaque, moins le temps nécessaire à la propagation de l'onde jusqu'au point exploré. La valeur du retard essentiel varie un peu suivant les expérimentateurs, comme le montre le tableau suivant :

Rive	0,073
Landois	0,085
Edgren	0,096-0,087
Krunmach	0,07
Keyt	0,054
Hurthle	0,07

On pourra donc inscrire sur le cardiogramme le moment précis de l'ouverture des valvules sigmoïdes. Pour Potain (1), Martius et Edgren, il correspond exactement au sommet de la ligne d'ascension. Frédéricq admet, d'après les expériences faites sur le chien, qu'il répond à un point de la ligne d'ascension compris entre *b* et *c* (fig. 311).

Frey a recueilli, chez l'homme, des tracés comparatifs de la pulsation carotidienne et du cardiogramme, où l'on voit très nettement que la pulsation

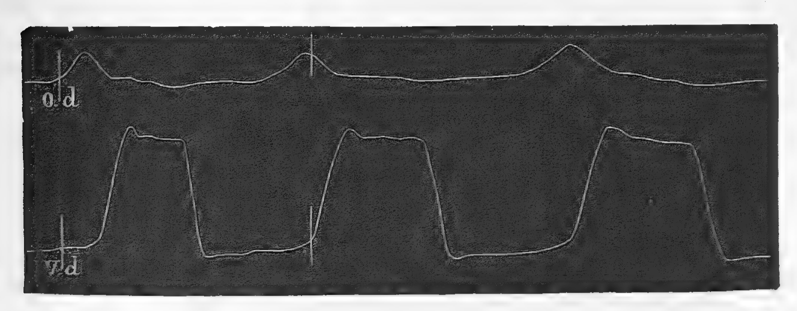


Fig. 312. — Tracés cardiographiques de l'oreillette O*d* et du ventricule V*d* droits chez une femme atteinte d'ectopie du cœur (d'après François Franck).

de l'artère débute bien avant que le cardiogramme ne soit arrivé à son sommet. On peut admettre que dans les cardiogrammes types, l'ouverture des orifices artériels se produit avant le sommet de la pulsation. Outre l'intérêt qu'il y a à fixer exactement, sur la courbe, la durée de la période présphygmique, ce détail a encore son importance à un autre point de vue. En effet, Martius, reprenant sous une nouvelle forme l'idée souvent exprimée, en particulier par Beau, que la production d'un choc contre la paroi ne se concilie pas avec une diminution de volume de l'organe, a soutenu que la ligne d'ascension du tracé devait correspondre tout entière à la phase pendant laquelle

(1) *Clinique médicale de la Charite*, 1894, p. 522.

le ventricule, étant fermé à ses deux orifices, ne pouvait réduire sa capacité. On voit que cet argument tombe à faux, puisque le tracé continue à monter pendant que le ventricule se vide.

Cependant, en raison des formes atypiques du cardiogramme, il arrivera sans doute souvent que la pénétration du sang dans l'aorte coïncidera avec le sommet de la ligne d'ascension.

Il faut reconnaître, en effet, que chez l'homme, malgré toutes les précautions que l'on pourra prendre, on n'est jamais sûr que la courbe de la pulsation suive exactement les variations de la pression intraventriculaire, puisque le moyen de contrôle manque. Rien n'est plus varié, dit à juste raison Marey, que les formes de la pulsation du cœur à l'état physiologique (1), et les tracés de Hurthle nous montrent d'autre part que le cardiogramme peut être tout à fait anormal, alors même qu'il présente une forme trapézoïde parfaite. On ne doit donc pas compter pouvoir déchiffrer la courbe de la pulsation d'après un schéma fait à l'avance et applicable à tous les cas. Tant que l'emploi des instruments qui permettent d'enregistrer automatiquement les bruits du cœur ne se sera pas généralisé, la comparaison du cardiogramme avec le tracé de la pulsation carotidienne fournira les renseignements les plus utiles : mais il faudra tenir bien compte des deux facteurs du retard du pouls sur la systole ventriculaire et les évaluer directement sur le sujet en expérience par les méthodes appropriées.

5° *Pulsation du cœur de la grenouille, de la tortue.* — On a construit différents instruments pour enregistrer la pulsation du cœur chez la grenouille. Celui de Marey est un des plus usités (fig. 313). Le cœur est saisi

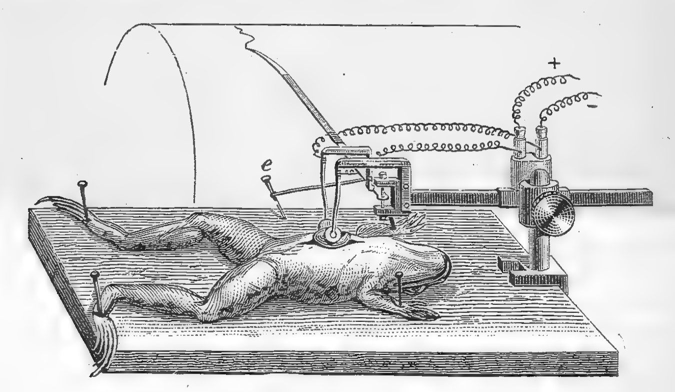


Fig. 313. — Pince myographique du cœur (Marey).

entre les mors d'une sorte de pince formée de deux cuillerons portés chacun par un bras coudé. L'un de ces bras est fixe ; l'autre, mobile, porte un levier horizontal qui est perpendiculairement implanté sur lui et qui, par son extrémité munie d'une plume, trace sur un cylindre enfumé. Le cuilleron mobile est rappelé par un fil de caoutchouc fixé à une épingle. A. René a remplacé le fil par un poids qui permet de graduer exactement la pression exercée sur

(1) Voy. aussi Potain, *loc. cit.*, p. 514.

le cœur. Vibert et Verdin ont modifié le cardiographe de façon qu'il puisse inscrire soit sur un cylindre vertical, soit sur un cylindre horizontal.

Un simple levier horizontal, muni d'un curseur auquel sera appendue une tige légère s'appliquant sur le cœur pourra servir à enregistrer la pulsation du cœur chez la grenouille. C'est sur ce même principe que repose l'appareil de François Franck (fig. 314), celui de Soukonoff, destinés à recueillir les mouvements successifs de l'oreillette et du ventricule chez la tortue.

Les graphiques ainsi obtenus montrent encore une fois combien la courbe myographique simple, celle du ventricule se contractant à vide, diffère de celle de la pulsation. D'une part, c'est une ascension et une descente sans accident, un sommet arrondi. Sur le tracé de la pulsation, au contraire, la

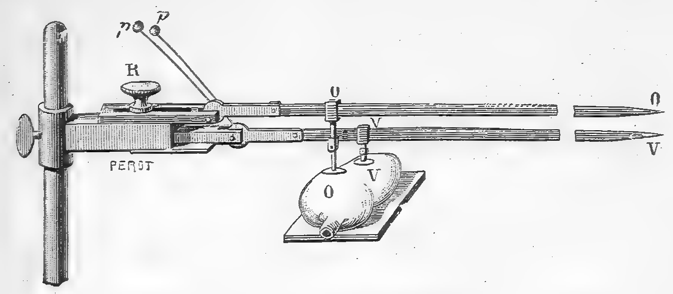


Fig. 314. — Double myographe pour le cœur de la grenouille ou de la tortue, de Fr. Franck.

réplétion du ventricule se traduit par une ligne ascendante qui se substitue à la pente descendante du simple relâchement musculaire, et qui présente en même temps l'ondulation due à la systole de l'oreillette; puis, pendant la systole ventriculaire, un plateau presque horizontal, enfin une chute brusque. La courbe de la pulsation diffère de celle des mammifères par la brièveté de sa période diastolique, par l'absence du vide post-systolique.

6° *Durée des périodes de la révolution cardiaque.* — Quand il s'agit d'établir les rapports des diverses phases d'une révolution du cœur avec le tracé de la pression intraventriculaire ou du cardiogramme, une question se pose. Où finit la systole du ventricule? Est-ce avec la fermeture des valvules sigmoïdes, ce qui correspondrait à un point voisin de l'origine de la ligne de descente, ou faut-il comprendre dans la systole cette ligne tout entière? En faveur de la première opinion, on peut faire valoir que l'effet utile de la contraction ventriculaire cesse avec l'occlusion des valvules artérielles ; en faveur de la seconde, que la période de relâchement n'est pas encore pour le muscle une période d'inactivité. La question de la nomenclature (1) se complique encore si l'on admet avec quelques physiologistes que le ventricule reste en systole après que les valvules sigmoïdes sont fermées.

L'interprétation du tracé de la courbe intraventriculaire, telle que l'avaient donnée primitivement Chauveau et Marey, ne soulevait pas cette difficulté, puisque la clôture des valvules sigmoïdes concordait précisément avec l'ex-

(1) Voy. Martius, *Zeitschr. f. klin. Med.*, t. XIX, 1891.

trémité inférieure de la ligne de descente. D'après cette donnée, la révolution cardiaque chez le cheval se distribuait de la façon suivante : systole de l'oreillette 0,1″; intervalle qui la sépare de celle du ventricule 0,1″ à 0,2″; systole du ventricule 0,3 à 0,4″; diastole générale ou pause 0,6″. La durée de la diastole générale est donc à peu près égale à la durée des mouvements de la révolution cardiaque.

Rien n'empêcherait d'ailleurs de continuer à faire concorder le début de la diastole avec l'extrémité inférieure de la ligne de descente du tracé, puisque c'est à partir de là que commence véritablement la phase de repos du cœur. Mais pratiquement il est préférable d'entendre sous le nom de systole, comme on le fait du reste généralement, l'intervalle compris entre les deux bruits du cœur, c'est-à-dire sur les tracés, l'intervalle compris entre le début de la systole ventriculaire et le point qui correspond à la fermeture des valvules sigmoïdes.

Chez l'homme, c'est du reste en mesurant cet intervalle, soit au moyen du métronome, soit au moyen d'un signal, que l'on a fixé la durée relative de la systole et de la diastole ventriculaires. Voici quelques chiffres obtenus de la sorte :

Fréquence des pulsations.	Durée de la systole ventriculaire.	Durée de la diastole ventriculaire.	Auteurs.
84	0,375″	0,380	Volkmann.
74 à 94	0,327 à 0,301″	»	Donders.
55 à 65	0,300 à 0,327″	»	Landois.
70	0,379″	0,483	Edgren.

La durée de la systole, en règle générale, ne se modifie pas très sensiblement avec la fréquence des pulsations. Le nombre des battements variant entre 32 et 124, elle n'oscillait qu'entre 0,190 et 0,382″ d'après un grand nombre d'observations citées par Tigerstedt (1).

Pour fixer les idées, on peut, avec Foster (2), adopter les chiffres approximatifs suivants. Si le nombre des battements du cœur est de 75 par minute, la durée d'une révolution sera 0,8″, la durée de la systole auriculaire 0,1″ environ, celle de la systole ventriculaire 0,3″, la durée de la diastole 0,4″, y compris la période du relâchement du ventricule qui durerait moins de 0,1″. La systole ventriculaire comprend 0,05 pour l'intervalle présphygmique (3) et 0,25 pour la période d'évacuation.

IV. — VARIATIONS DE VOLUME DU CŒUR. CARDIOGRAPHIE VOLUMÉTRIQUE. — PHÉNOMÈNES CARDIO-PNEUMATIQUES. — PULSATION NÉGATIVE

Le volume des ventricules passe pendant une révolution du cœur par diverses phases : 1° dans la première période de la systole ou intervalle pré-

(1) *Physiol. des Kreislaufes*, p. 130.
(2) *Text Book of Physiol.*, Part. I, p. 264.
(3) Foster dit : 0,02 à 0,03; ce chiffre est un peu trop faible pour l'homme.

sphygmique, il ne peut pas se modifier ; 2° il diminue pendant que le ventricule se vide et arrive alors à son minimum ; 3° il se maintiendrait à ce minimum pour les physiologistes qui admettent, avec Frey, qu'un court espace de temps sépare la fermeture des valvules sigmoïdes de l'ouverture des valvules auriculo-ventriculaires, temps nécessaire pour que la pression dans l'oreillette soit devenue supérieure à la pression dans le ventricule ; 4° enfin, le volume augmente pendant la période de réplétion, jusqu'à ce que les valvules auriculo-ventriculaires, à la révolution suivante, se ferment de nouveau. Mais, en résumé, on peut dire que le volume du cœur diminue pendant la systole et augmente pendant la diastole.

Ces variations peuvent être inscrites par des moyens appropriés : c'est là l'objet de la cardiographie volumétrique ou cardio-pléthysmographie. Quand on procède à cette étude sur un cœur de grenouille isolé, rien de plus simple : les méthodes peuvent varier, le principe reste toujours le même. L'organe étant enlevé avec ses vaisseaux afférents et efférents est suspendu dans un récipient fermé dont le bouchon laissera passer les canules par lesquelles on entretient dans le cœur une circulation artificielle ; un autre orifice mettra en communication la cavité du récipient avec un appareil inscripteur.

Le récipient peut être plein d'air comme dans le dispositif de Marey, mais habituellement il est rempli de liquide (huile, solution de chlorure de sodium, etc.) (1). Dans l'appareil de François Franck (2), le petit flacon se recourbe par en bas pour se continuer avec un tube étroit terminé par une boule (fig. 315) : les variations du niveau du liquide produisent dans la boule des compressions et des raréfactions alternatives de l'air qui sont transmises à un tambour enregistreur.

Fig. 315. — Appareil à déplacement pour l'étude des changements de volume du cœur ; V, tube d'afflux ; A, tube d'écoulement.

Dans l'appareil de Fick et Blasius (3), les excursions du liquide se font dans un tube manométrique qui communique avec l'extrémité inférieure du récipient : la branche libre du manomètre porte un flotteur muni d'un style inscripteur ; comme dans les procédés de Marey et de Fr. Franck, la diminution de volume pendant la systole se traduira par un abaissement de la courbe, l'augmentation diastolique par une ligne ascendante.

Le tonomètre de Roy (4) se distingue des précédents appareils en ce que les alternatives de vacuité et de réplétion s'inscrivent au moyen d'un piston relié au levier enregistreur.

Pour étudier les variations de volume du cœur des mammifères *in situ*, Roy (5) a également construit un appareil spécial, le cardiomètre, sur le modèle de ses autres oncomètres. Mais on peut se servir aussi, comme pléthys-

(1) *Trav. du laborat.* de M. Marey, 1875, p. 62.
(2) *Ibid.*, 1877, p. 192.
(3) *Arb. aus d. physiol. Laborat. zu Wurzburg*, 1872.
(4) *Journ. of Physiol.*, t. I, p. 452.
(5) *British med. Journ.*, 1888, t. II, p. 1321.

mographe, ainsi que l'a fait le premier Fr. Franck (1), du sac péricardique dans lequel on place une canule qui est mise en communication, soit avec un tambour de Marey, soit, pour éviter les variations de résistance de la membrane de caoutchouc, avec un piston enregistreur, le piston recorder d'Ellis (Johansson et Tigerstedt) (2). Knoll a décrit une canule destinée à être introduite directement dans le péricarde à travers la paroi thoracique. Dans les courbes obtenues par le procédé péricardique, la ligne d'ascension répond à la réplétion diastolique et la ligne de descente à l'évacuation systolique. Dans ce procédé d'ailleurs, ainsi que dans celui de Roy, les variations de volume des gros vaisseaux s'inscrivent aussi bien que celles des oreillettes. Johansson et Tigerstedt ont décrit un pléthysmographe fort simple, pour loger uniquement le ventricule.

On peut se faire aussi une idée assez exacte de la valeur comparative des systoles auriculaires par la méthode de Fr. Franck. Elle consiste à faire agir la paroi de l'oreillette sur la membrane très souple d'un explorateur qui obéisse à tous ses changements de volume. On obtient ce résultat en reliant d'une manière fixe la membrane du tambour à la paroi auriculaire au moyen d'une petite serre-fine. Quand la paroi se tend sous l'influence de la réplétion intérieure, elle refoule l'air du tambour, tandis qu'au moment de la systole la serre-fine est attirée brusquement et rappelle l'air dans le tambour; on exerce au moyen de la serre-fine une légère traction sur la paroi de l'oreillette. Fr. Franck a également appliqué le procédé à l'exploration du ventricule (3).

Les changements de volume du cœur ont été surtout étudiés en vue de déterminer l'influence de divers facteurs sur le débit et le travail du cœur: on aura à revenir, dans le chapitre suivant, sur quelques-uns des résultats obtenus. Mais ces variations volumétriques se manifestent aussi par des phénomènes physiologiques dignes d'intérêt: ce sont les mouvements dits cardiopneumatiques et la pulsation négative.

Quand les ventricules se vident, une certaine quantité de sang s'échappe par l'aorte hors de la cavité thoracique. Leur évacuation devra donc s'accompagner d'une aspiration à laquelle les parois mobiles qui avoisinent le cœur, les poumons en particulier, seront obligées de céder. La diminution systolique de volume se traduira par un appel d'air vers la cavité trachéo-bronchique, c'est-à-dire par une légère inspiration; l'augmentation diastolique par un mouvement en sens inverse. Si donc, dans l'état d'immobilité du thorax, on met la trachée d'un animal en rapport avec le tube à transmission d'un tambour de Marey, le va-et-vient d'air se marquera alternativement par un abaissement de la courbe au moment de la systole, par une ascension pendant la diastole. On peut faire la même expérience chez l'homme au moyen d'un tube placé soit dans la cavité buccale, soit dans l'une des fosses nasales: il faut naturellement que la glotte soit ouverte pour que ces cavités soient

(1) *Trav. du laborat.* de M. Marey, t. III, p. 187.
(2) *Skand. Arch. f. Physiol.*, t. II, 409.
(3) *Arch. de physiol.*, 1890, p. 402, et 1891, p. 768.

en communication avec la trachée, sinon on inscrirait les pulsations totalisées des vaisseaux de la région explorée.

Ces déplacements d'air dans les voies respiratoires, liés aux mouvements du cœur, ont été étudiés par Landois, d'après le procédé des flammes manométriques. On peut les rendre visibles aussi au moyen des soupapes de Muller (Voit) (1). Ceradini (2), Landois (3) ont construit pour les enregistrer des appareils spéciaux, mais qui n'offrent pas d'avantage appréciable sur le simple tambour de Marey.

La courbe inscrite par ces différents moyens présente encore sur la ligne d'ascension et celle de descente quelques accidents sur lesquels on n'est pas d'accord. Landois, Ceradini ont fait remarquer, par exemple, que le grand mouvement inspiratoire dû à la systole est précédé d'un léger mouvement d'expiration, parce qu'au début de la systole le sang du ventricule n'a pas encore quitté le thorax, tandis que le sang veineux amené par les veines caves continue à affluer vers l'oreillette droite. Chez l'homme, Mosso (4), par contre, en inscrivant simultanément le pouls carotidien et le mouvement cardio-pneumatique (par un tube placé dans une fosse nasale), trouve que l'appel d'air doit se produire avant la pénétration même du sang dans l'aorte, parce que le ventricule en se durcissant produit un léger soulèvement de la paroi et par conséquent une faible dilatation de la cavité thoracique. Ces détails de la courbe n'ont d'ailleurs qu'un intérêt secondaire.

Le mécanisme des mouvements cardio-pneumatiques, tel qu'il vient d'être exposé, implique qu'ils ne peuvent se produire qu'autant que la cage thoracique forme cavité close : cela résulte en effet des expériences de Fr. Franck. Cependant Haycraft et Edie (5) disent les avoir vu persister après l'ouverture du thorax et ils les attribuent à une sorte de massage du poumon par le cœur.

Il n'est pas douteux cependant que la diminution de volume du cœur doive produire un renforcement du vide thoracique. Cette aspiration ne se transmet pas seulement à l'air contenu dans les voies respiratoires, mais aussi au sang des grosses veines qui pénètrent dans le thorax, et elle contribue par conséquent à la réplétion des oreillettes, concurremment avec l'aspiration systolique propre au cœur lui-même, dont il a déjà été question.

Enfin, l'appel que crée autour du cœur sa diminution de volume s'exerce aussi sur les parois thoraciques et produit la pulsation négative. Le cardiographe appliqué sur le thorax pourra inscrire une ligne de descente au moment de la systole, une ligne d'ascension pendant la diastole, en un mot un tracé renversé du choc du cœur. La courbe n'enregistre plus alors les changements de consistance, mais uniquement les changements de volume du cœur. Buisson (6), qui le premier a observé la pulsation négative, a fait remarquer qu'elle s'obtenait dès qu'on s'éloigne des points où le ventricule n'est pas

(1) *Zeitschr. f. Biol.*, t. I, p. 390, 1865.
(2) Cité d'après Rollett, *in* Hermann's *Handb.*
(3) *Traité de physiol.*, édit. franç., 1893, p. 107.
(4) *Diagnostik des Pulses*, 1879, p. 42.
(5) *Journ. of Physiol.*, XII, p. 426.
(6) *Gaz. méd. de Paris*, 1861, p. 320.

en contact intime avec la paroi thoracique. En général, il suffit que l'explorateur soit appliqué à une certaine distance de la région qui donne la pulsation positive pour que le cardiogramme soit plus ou moins déformé sous l'influence des variations de volume. C'est sans doute ainsi que Haycraft (1) est arrivé à décrire le cardiogramme négatif comme typique chez l'homme.

On a encore rattaché au mouvement cardio-pneumatique la pulsation cardio-œsophagienne. Si chez un chien on introduit dans l'œsophage jusqu'à l'entrée du thorax une sonde munie à son extrémité d'une ampoule de caoutchouc, on verra s'inscrire, en l'absence de tout mouvement respiratoire, des pulsations synchrones aux mouvements du cœur. Dans la région indiquée, le graphique de cette pulsation est relativement simple : elle représente presque exactement un tracé de pulsation artérielle, mais renversée, négative. On serait tenté au premier abord de la considérer également comme une manifestation du même genre que les précédentes : l'aspiration créée par la diminution de volume du cœur s'exercerait aussi sur le contenu de l'œsophage. Cette opinion a en effet été soutenue par Martius (2). Frédéricq a constaté au contraire que ce phénomène persiste encore après ouverture du thorax et il l'attribue à l'effort de traction exercé par le recul du cœur sur l'œsophage par l'intermédiaire de l'oreillette gauche. Si l'on enfonce la sonde plus loin dans le thorax, la courbe présente encore d'autres accidents dont Martius, Frédéricq, Sarolea, ont cherché à donner l'explication (3).

Mentionnons enfin que la radiographie a éte appliquée à l'étude des variaions de volume du cœur, en particulier par Zuntz et Schumburg (4) et par Bouchard (5).

V. — FORCE, DÉBIT, TRAVAIL DU CŒUR

A. Nous savons que le ventricule gauche supporte au moment de la systole une pression d'environ 150^{mm} Hg, c'est-à-dire le poids d'un cylindre de mercure qui aurait pour base la surface interne du ventricule, qu'on suppose étalée sur un plan, et pour hauteur 150^{mm} Hg.

Le poids de cette colonne mesure aussi l'effort exécuté par le ventricule au moment de sa systole, puisqu'il fait équilibre à cette pression en se contractant : c'est ce qu'on appelle la force statique du cœur. Pour chaque centimètre carré, cette force équivaut donc à $150 \times 100^{mmq} \times 13{,}6$ (densité du mercure), soit 204 grammes. Il est difficile d'évaluer exactement la force totale du cœur, puisqu'on manque de déterminations précises sur la mesure de la face interne du ventricule.

Le travail du cœur, c'est l'effet produit par la force motrice, évalué en kilogrammètres. On attribue généralement à R. Mayer (1845) la première

(1) *Journ. of Physiol.*, XII, 1891, p. 238.
(2) *Zeitschr. f. klin. Med.*, XIII, 1888.
(3) *Trav. du laborat.* de Frédéricq, 1887-1888, p. 127, et 1889-1890, p. 61.
(4) *Arch. f. Physiol.*, 1896, p. 550.
(5) *Soc. de biol.*, 1898, p. 95.

évaluation rationnelle de ce travail. Heidenhain, dans une notice historique à ce sujet, a montré que Passavant, élève de Bernouilli, s'en était déjà fait une idée très exacte (1).

Les bases sur lesquelles s'appuie ce calcul sont les suivantes. Le ventricule gauche lance à chaque systole dans l'aorte un poids p de sang sous une pression de 150mm Hg ; il est donc capable de soulever à chaque systole cette quantité p à une hauteur de 2 mètres environ (2) et il exécute un travail $p \times H$ si nous appelons H cette pression. La valeur de cette pression mesure, en effet, la résistance que le sang doit vaincre sur toute l'étendue de son parcours et le produit $p \times H$ représente le travail nécessaire pour vaincre les résistances opposées à la circulation (3).

Mais il faut tenir compte également de celui qui est dépensé pour communiquer à la masse m du sang qui pénètre dans l'aorte la vitesse v. Ce travail est mesuré par la demi-variation des forces vives $\frac{mv^2}{2}$: remplaçant m par sa valeur $\frac{p}{g}$, nous avons $\frac{pv^2}{2g}$, (g, accélération de la pesanteur $=9{,}81$).

On peut encore arriver à l'expression du travail qui produit la vitesse d'après les considérations suivantes. La vitesse v est celle que prendrait un corps tombant librement de la hauteur h : par conséquent, d'après la formule de Toricelli :

$$v = \sqrt{2gh}$$

d'où l'on tire

$$h = \frac{v^2}{2g}.$$

le travail nécessaire pour communiquer la vitesse v à un poids p de sang sera :

$$v \frac{v^2}{2g}.$$

Le travail total sera donc :

$$pH + p\frac{v^2}{2g} = p\left(H + \frac{v^2}{2g}\right).$$

Pour évaluer le travail du cœur, il faut par conséquent connaître la pression et la vitesse du sang, et la quantité de liquide lancée à chaque systole par le ventricule.

B. ***Débit systolique***. — Un grand nombre de méthodes ont été employées pour déterminer cette dernière valeur, le débit systolique : nous allons rapidement les passer en revue.

1° On pèse comparativement le cœur à l'état de vacuité et à l'état de

(1) *Arch. de Pfluger.*, 1892, t. LII, p. 415.

(2) La densité du mercure étant de 13,6, celle du sang de 1,06, 150mm Hg $= 150 \times \frac{13{,}6}{1{,}06}$, soit 1,92 m de sang.

(3) Voy. Monoyer, in *Traité élémentaire de physique médicale* de Wundt. — Imbert, *Traité de physique médicale*, p. 196.

réplétion [Santorini (1), Dogiel (2), Abegg] ou bien on évalue le volume des cavités du cœur en les remplissant avec une masse solidifiable (Hiffelsheim et Robin) (3). Ces procédés ne donnent que des résultats incertains, parce que ceux-ci varient suivant la pression sous laquelle se fait la réplétion, et surtout parce qu'il est démontré que le ventricule ne se vide pas complètement au moment de la systole.

La déplétion incomplète de la poche cardiaque est une conséquence du mode d'occlusion des valvules auriculo-ventriculaires ; il doit rester du sang sous le dôme formé par les replis. Chauveau et Faivre s'en étaient assurés en introduisant le doigt dans le ventricule. Roy et Adami (4), récemment, ont fait la même observation par le même procédé ; passant un doigt à travers la pointe du cœur, ils ont constaté que la cavité du ventricule ne se comble pendant la systole que dans sa partie inférieure, mais qu'elle persiste entre le sommet des muscles papillaires et les valvules auriculo-ventriculaires. Sandborg et Worm-Muller (5), Hesse (6), Krehl (7), sont arrivés à des résultats identiques en étudiant la configuration des cavités du cœur sur des organes en état de rigidité cadavérique ou thermique. Johansson et Tigerstedt, Roy et Adami ont montré de plus, par la méthode pléthysmographique, que la quantité de sang qui reste dans le ventricule varie avec les résistances périphériques.

2° Le procédé de Volkmann (8) et de Vierordt (9) pour déterminer le débit systolique repose sur le principe suivant. Si l'on veut évaluer la quantité de liquide qu'un réservoir débite en un temps donné, il suffit de connaître l'aire de l'orifice d'écoulement et la vitesse du courant qui s'en échappe, puis de multiplier ces quantités l'une par l'autre, c'est-à-dire de représenter la quantité de liquide qui sort en une seconde, par exemple, sous la forme d'un cylindre dont la base serait l'aire de l'orifice et la hauteur la distance parcourue par une molécule de liquide durant cet espace de temps. Il suffira donc de connaître la vitesse du sang dans l'aorte et la surface de section de ce vaisseau pour connaître la quantité de liquide débitée. Vierordt, par exemple, a établi ses calculs sur les bases suivantes. Il détermine au moyen de son hémodromomètre la vitesse du sang dans la carotide du chien, soit 261 millimètres en une seconde. Il applique cette donnée à l'homme : d'autre part, chez ce dernier la surface de section est pour la carotide de 0,63 centimètre carré, pour la sous-clavière droite 0,99 centimètre carré, pour le tronc brachio-céphalique 1,44 centimètre carré, enfin pour la surface de section de l'aorte immédiatement au delà de l'origine du tronc brachio-céphalique 4,39 centimètres carrés. Il passe donc dans la carotide $26{,}1 \times 0{,}63 = 16{,}4$ centimètres cubes ; dans la sous-clavière, en admettant la même vitesse que

(1) *Observat. anatomicæ*, p. 144, 1724.
(2) *Verhandl. d. sächs. Gesellsch. d. Wissensch.*, Bd XIX, p. 248, 1868.
(3) *Journ. de l'anat.*, t. I, p. 413, 1864.
(4) *British med. Journ.*, 1888, II, p. 1321.
(5) *Loc. cit.*
(6) *Loc. cit.*
(7) *Loc. cit.*
(8) *Die Hæmodynamik*. Leipzig, 1850, p. 204.
(9) *Die Erscheinungen und Gesetze der Stromgeschwindigkeiten des Blutes*. Franckfurt, 1858, p. 504.

pour la carotide, $26{,}1 \times 0{,}99 = 25{,}8$ centimètres cubes ; et enfin dans le tronc brachio-céphalique $16{,}4 + 25{,}8^{cc} = 42{,}2$. Vierordt estime en suite que la vitesse du sang dans l'arc de l'aorte au-dessous de l'origine du tronc brachio-céphalique est supérieure du quart environ à celle de ce dernier vaisseau (1) ; il passe donc dans l'arc aortique 161 centimètres cubes. Par conséquent, la quantité de sang qui traverse l'ensemble des vaisseaux sera de 161+42,2 ; à quoi il faut encore ajouter 4 centimètres cubes pour les vaisseaux coronaires. L'aorte reçoit donc 207 centimètres cubes de sang en une seconde, ce qui équivaut à 172 centimètres cubes ou 180 grammes de sang pour chaque systole, si la fréquence des pulsations est de 72 à la minute. Pour Vierordt, par conséquent, le débit systolique est de $\frac{1}{353}$ du poids du corps évalué à 63,6 kilogrammes. Volkmann, par des déterminations analogues faites sur des animaux d'espèces diverses, avait trouvé que la quantité de sang évacué à chaque systole était en moyenne au poids du corps comme 1 : 400 ; il en avait donc déduit que chez l'homme du poids moyen de 75 kilogrammes le débit était de 188 grammes.

Ces chiffres ont été longtemps et sont encore classiques. Cependant on tend généralement aujourd'hui à les considérer comme beaucoup trop élevés, d'après les résultats obtenus par d'autres procédés. On n'est pas autorisé, en effet, à calculer la vitesse dans l'aorte d'après la vitesse mesurée dans la carotide en se basant uniquement sur les rapports des surfaces de section. On ne tient pas compte, dans ce calcul, de l'influence que peuvent avoir la courbe de l'aorte et l'angle sous lequel se fait la division des vaisseaux sur la répartition du sang entre le tronc brachio-céphalique et la partie de l'arc aortique située immédiatement au delà de ce tronc, ni de celle que peut exercer dans le même sens la différence des résistances respectives dans le domaine du tronc brachio-céphalique et dans celui de l'aorte descendante. Sous ce rapport, les estimations de Volkmann et de Vierordt sont tout arbitraires. En effet, tandis que pour le premier la vitesse est la même dans les deux segments considérés, Vierordt admet, comme il a été dit, que dans l'arc aortique elle est supérieure d'un quart à celle du tronc brachio-céphalique.

3° La méthode qui devra fournir les meilleurs résultats est évidemment celle qui permettra ed déterminer directement le débit du ventricule. Stolnikow (2), le premier, y a eu recours dans des expériences faites sur le chien. L'aorte descendante étant oblitérée par un obturateur spécial, les vaisseaux qui prennent origine sur la crosse de l'aorte étaient liés, sauf l'artère sous-clavière droite : celle-ci laissait échapper son sang dans un récipient jaugé ; puis ce sang était ramené par la veine jugulaire dans l'oreillette droite pendant qu'en même temps l'artère envoyait son contenu dans un second récipient semblable dont il s'écoulait encore de la même manière. La figure 317 reproduit le dispositif qui répond au but indiqué. On voit que l'artère et la

(1) Elle est pour le tronc brachio-céphalique de $\frac{42{,}2 \text{ c. cubes}}{1{,}44 \text{ c. carré}} = 29{,}3$ centim. et par conséquent dans l'arc de l'aorte, d'après l'estimation de Vierordt, 36,6.

(2) *Arch. f. Physiol.*, 1886, p. 1.

veine sont mises chacune en communication avec deux réservoirs I et II. Supposons que les tubes RR soient oblitérés, l'artère se continuera alors avec le cylindre I, la veine avec le cylindre II; si, au contraire, les tubes LL sont oblitérés et les tubes RR ouverts, l'artère laissera échapper son sang dans le réservoir II, et c'est le réservoir I qui se vide dans la veine. En résumé, pendant que l'artère se continue avec le réservoir I, la veine se continue avec le réservoir II et inversement.

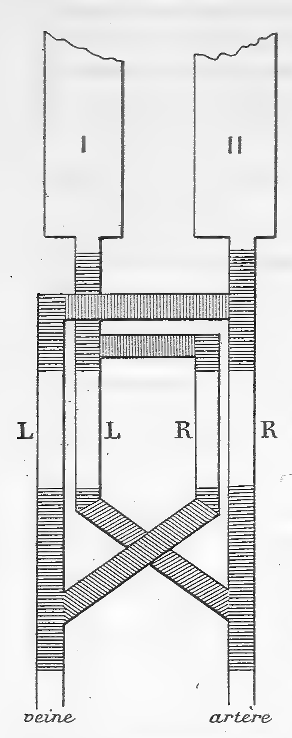


Fig. 316. — Appareil de Stolnikow pour mesurer le débit du ventricule gauche.

La portion des tubes de communication marquée en blanc sur la figure 316 est faite de tissu élastique : c'est en ce point que la compression alternative des tubes RR et LL a lieu par un mécanisme spécial. Les cylindres portent chacun un flotteur muni d'un style inscripteur : pendant que l'un monte, l'autre descend; comme les cylindres sont jaugés, les déplacements du style indiquent la quantité de sang reçue dans les réservoirs et celle qui s'en échappe. On inscrit en même temps le temps et le nombre de pulsations, et on pourra ainsi déterminer le débit systolique (1).

Mais dans les expériences de Stolnikow, la circulation était réduite aux poumons et à l'arc de l'aorte, le cœur se vidait presque sans résistance (pression 30 à 40^{mm} Hg), et il avait en outre à sa disposition une grande quantité de sang veineux. Aussi, comme le fait remarquer Tigerstedt, les valeurs obtenues doivent-elles être considérées comme des maxima. Stolnikow a trouvé aussi que chez le chien le débit systolique était compris entre un minimum de 0,00032 et un maximum de 0,00160, si le poids du corps = 1. D'après les chiffres de Vierordt il serait de 0,00283.

Tigerstedt (2) est arrivé à mesurer directement chez le lapin la vitesse du sang dans l'aorte avant la division du vaisseau, au moyen d'un appareil construit sur le modèle de la Stromuhr de Ludwig. Ce qui rend possible cette opération, c'est que l'on peut, au moyen d'une pince appliquée sur le sillon auriculo-ventriculaire, s'opposer à l'afflux du sang dans le ventricule pendant 3 à 5 minutes sans que l'animal succombe. Tigerstedt a trouvé ainsi que, dans les conditions les plus rapprochées de la normale, le débit systolique (Pulsvolumen ou Schlagvolumen) est de 0,00027, et le volume par seconde (Secundvolumen) de 0,00085 du poids du corps, pour une fréquence moyenne de 32,2 pulsations en 10″ et une pression de 88,5 à 176^{mm} Hg.

3° Un procédé qui repose sur un principe tout autre que les précédents

(1) Voy. pour les modifications apportées à l'appareil primitif, Pawlow, *Arch. f. Physiol.*, 1887, p. 452.
(2) *Skand. Arch. f. Physiol.*, III, p. 145, 1891.

consiste à évaluer la quantité de sang qui passe par le poumon, qui est par conséquent chassé par le ventricule droit, en un temps donné. Ce procédé paraît avoir été indiqué pour la première fois par A. Fick (1), mais des déterminations de ce genre ont été réalisées par Gréhant et Quinquaud (2) et par Zuntz (3). Si on mesure les gaz du sang artériel et du sang veineux et en même temps la composition de l'air expiré, on peut en déduire la quantité de sang lancé par le cœur. Un cheval au repos de Zuntz absorbait, par exemple, 2 733 centimètres cubes d'O par minute : en même temps, on trouva que le sang artériel contenait 10,33 p. 100 d'O en plus que le sang veineux, c'est-à-dire que 100 centimètres cubes de sang, en traversant le poumon, avaient absorbé 10,33. Il a été absorbé en tout 2 733 centimètres cubes d'O, il a donc passé : $\frac{100 \times 2\,733}{10,33} = 26\,457$ centimètres cubes de sang par les poumons en une minute. Le ventricule droit a donc chassé 26 litres et demi environ de sang dans l'artère pulmonaire ; et dans le même temps, le ventricule gauche a dû en envoyer autant dans l'aorte. Le débit par seconde était de 0,00122 du poids du corps (360 kilogrammes chez l'animal en expérience). Chez le chien, Zuntz (4) a trouvé 0,00157.

4° Enfin, Hoorweg (5) a évalué la quantité de sang lancé par le ventricule à chaque systole, en mesurant la surface de la courbe de la pulsation artérielle : il a en effet établi que le débit systolique est proportionnel à la surface de la courbe du sphygmogramme.

On a vu déjà combien les données diffèrent sur la valeur qui nous occupe. Hoorweg a résumé ces divergences dans le tableau suivant :

Thomas Young	45 gr.
Volkmann	188 —
Vierordt	180 —
Huxley	100 —
Fick	50-73 —
Hoorweg	47 —

A quoi il faut encore ajouter le chiffre de Zuntz qui évalue le débit systolique chez l'homme à environ 60 centimètres cubes, chiffre que Tigerstedt trouve également d'accord avec ses propres expériences.

Comme le fait remarquer ce physiologiste, on peut considérer comme très probable que la valeur du débit par systole est comprise entre 50 et 100 centimètres cubes.

Dans le premier cas, le travail du ventricule gauche serait environ : 50 gr. $\times$ 0,150 m. $\times$ 13,6 = 102 grammètres. Dans le second cas, il serait de 204 grammètres.

(1) Cité par Stolnikow (*loc. cit.*).
(2) *Soc. de biol.*, 1896, p. 159.
(3) *Deutsche med. Wochenschr.*, 1892, p. 109.
(4) On doit encore à Zuntz la méthode suivante. Le cœur est arrêté par excitation du pneumogastrique et l'on injecte dans l'aorte la quantité de sang nécessaire pour ramener la pression artérielle à sa valeur primitive : cette quantité représente celle que le cœur aurait lancée dans le même temps dans le système aortique (*Arch. de Pfluger.*, LV, 1894, p. 521).
(5) *Arch. de Pfluger.*, XLVI, 1890, p. 159.

D'autre part, le travail nécessaire pour communiquer au sang une vitesse de $0^m,50$ serait dans le premier cas de $\frac{50 \times 0,5^2}{2 \times 9,8} = 0,64$ grammètre, dans le second de 1,28 grammètre.

Le travail total du ventricule gauche pendant la systole serait donc compris entre 102,6 et 205,28 grammètres. La presque totalité du travail est, comme on voit, utilisée à vaincre les résistances; une faible partie seulement sert à imprimer au sang la vitesse qu'on lui trouve.

Le débit du ventricule droit doit évidemment être le même que celui du ventricule gauche, quelque inégale que puisse être la capacité des deux ventricules, quand on la mesure en y faisant des injections : sinon il se produirait une accumulation de sang, soit dans les capillaires pulmonaires, soit dans les capillaires généraux.

Connaissant la pression sous laquelle le ventricule droit envoie son contenu dans les poumons, et la vitesse dans l'artère pulmonaire étant égale à celle de l'aorte, on a tous les éléments pour apprécier le travail produit par le ventricule droit à chaque systole.

C. ***Mesure expérimentale du travail du cœur.*** — De nombreuses recherches ont été faites sur le travail du cœur de la grenouille ou de la tortue, soumis à une circulation artificielle et soulevant le mercure d'un manomètre. Elles sont dues principalement à Ludwig et à ses élèves Cyon (1), Coats (2), Bowditch (3) à Marey et d'autres physiologistes encore. Le poids de la colonne de mercure soulevée, multiplié par la hauteur de soulèvement, donnera la mesure du travail.

Le manomètre pour cœur de grenouille (fig. 317) est maintenant habituellement employé sous la forme que lui a donnée Kronecker (4). Deux burettes, *b*, *c*, fonctionnant comme flacons de Mariotte, peuvent être mises alternativement en rapport par l'intermédiaire d'un robinet à trois voies h_1 avec l'une des branches d'une canule double introduite dans le cœur; l'autre branche de la canule, plus large, communique avec le manomètre. Une branche du manomètre se continue avec un tube recourbé muni d'un robinet h_2, de telle sorte que quand ce dernier est ouvert, le liquide venant de la burette traverse le cœur sans que celui-ci agisse sur le manomètre. Par une position convenable du robinet h_1, on peut mettre soit l'une soit l'autre des burettes en communication avec le cœur et étudier ainsi l'influence des liquides de différente nature. En élevant ou en abaissant les tubes de verre qui plongent dans les burettes, on augmente ou on diminue la pression à laquelle le cœur est soumis pendant la diastole. L'organe est reçu dans un récipient coudé *r* renfermant avec une petite quantité de mercure, une solution physiologique de ClNa ; le mercure sert à compléter un circuit si l'on veut exciter électriquement le cœur. Quand le cœur doit actionner la colonne du manomètre, les robinets h_1 et h_2 sont fermés.

(1) *Ber. d. sächs. Gesellsch. d. Wissensch.*, 1866, p. 259.
(2) *Ibid.*, 1869, p. 362.
(3) *Ibid.*, 1871, p. 655.
(4) Cité d'après LANGENDORFF, *Physiolog. Graphik*, p. 170.

Le travail de l'organe, dans les expériences de ce genre, consiste à élever le mercure du niveau correspondant à la diastole au niveau correspondant à la systole.

Si r est le rayon du tube manométrique, d, la densité du mercure, h, la hauteur de la colonne de mercure dans la branche libre au-dessus du niveau diastolique, le poids de la colonne soulevée sera : $\pi r^2 dh$. Ce poids a été soulevé d'autre part à une hauteur h : tout se passe, en effet, comme si on avait enlevé la colonne de hauteur h dans la branche cardiaque, à partir du niveau primitif, pour la transporter, dans la branche ouverte, au-dessus de ce même niveau. Chaque particule ayant été soulevée d'une hauteur h, le travail sera : $\pi r^2 dh \times h = \pi r^2 dh^2$.

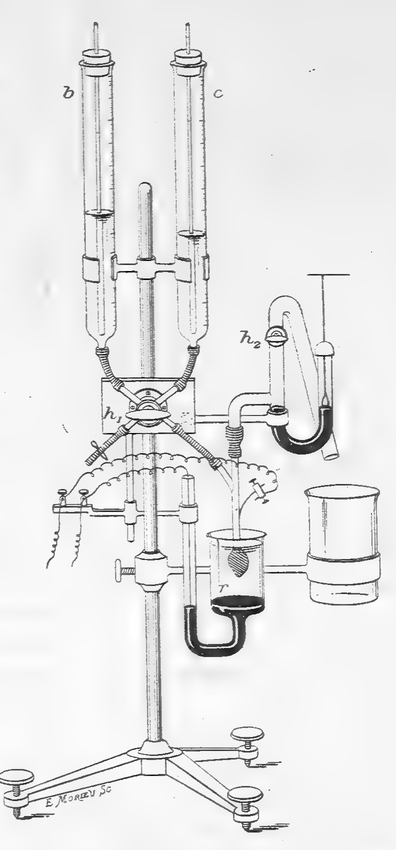


Fig. 317. — Manomètre pour cœur de grenouille, de Kronecker.

Le travail produit par chaque systole est donc proportionnel au carré de la hauteur de la pulsation.

On peut encore procéder d'une autre façon à la mesure du travail. On recueille la quantité de sang que le cœur chasse pour un temps donné et pour un nombre de pulsations donné; on a ainsi le débit systolique. On détermine, d'autre part, la pression sous laquelle le liquide a été versé ou la hauteur de soulèvement. Le produit donnera le travail du cœur. Le dispositif adopté dans ce but par Marey est représenté figure 318.

On enlève le cœur d'une grenouille ou d'une tortue, on adapte une canule de verre au tronc veineux commun V, une autre à l'une des aortes, on lie tousles autres vaisseaux. A chacune des canules est ajusté un long tube de caoutchouc d'assez gros calibre. Le tube qui se rend à l'oreillette est plongé dans un réservoir R rempli de sérum; le sang coulera par ce tube comme à travers une veine et pénètre dans l'oreillette, puis dans le ventricule. Ce dernier le lancera dans le tube A adapté à la branche aortique où le sang circulera comme dans une artère. Si l'on fixe l'orifice terminal e de ce tube au-dessus du réservoir, on verra s'établir une circulation continue. Un manomètre à mercure de fin calibre est placé à l'origine du tube artériel de manière à constater la pression du liquide dans ce conduit.

Pour mesurer le débit du cœur, on laissera le sang du tube artériel se

déverser pendant une minute, par exemple, dans une éprouvette graduée. On connaît, d'autre part, la pression moyenne, donnée par le manomètre. Si l'on veut étudier l'influence de la pression artérielle sur le travail, il suffit d'élever ou d'abaisser l'orifice d'écoulement du tube artériel (1).

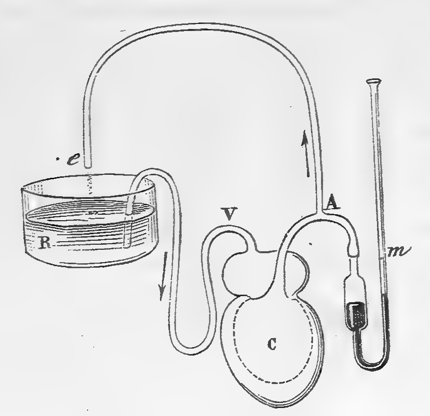


Fig. 318. — Appareil de Marey pour mesurer la force et le travail du cœur.

L'appareil employé par Dreser (2) reproduit la disposition générale de celui de Marey, sans le manomètre. De plus, sur le tube d'afflux et sur le tube d'écoulement sont disposées deux soupapes de Williams (3), qui remplacent l'une la valvule auriculo-ventriculaire, l'autre les valvules artérielles. Le récipient dans lequel le cœur est plongé est rempli d'une solution de ClNa et communique avec un tube gradué sur lequel on peut lire les variations de volume.

Des deux facteurs du produit $p \times h$, le débit p se mesure, soit d'après l'indication fournie par ce tube, soit en pesant la quantité de sang lancé par 10 pulsations, par exemple. Quand à la hauteur de soulèvement h, il n'y a lieu de tenir compte que de la distance entre le niveau du réservoir d'afflux et l'orifice d'écoulement, puisque, même à l'état d'inactivité du cœur, le sang monte dans le système des tubes communicants jusqu'à la hauteur du niveau du réservoir. C'est ainsi que dans la disposition donnée à l'appareil sur la figure 319, la hauteur du soulèvement est de 10 centimètres. On peut d'ailleurs la faire varier à volonté. Si elle doit rester constante, on se contente de mesurer les débits.

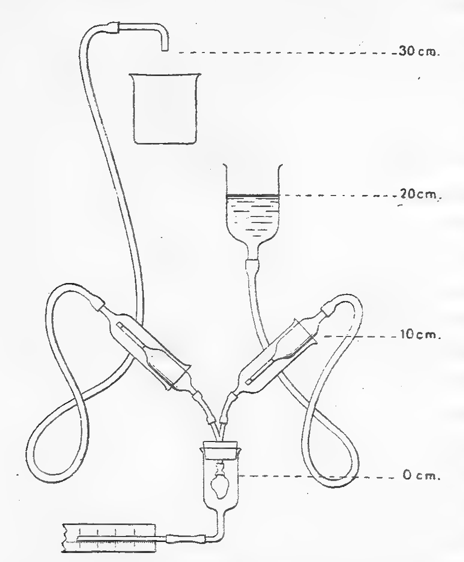


Fig. 319. — Appareil de Dreser pour mesurer le travail du cœur.

Des tentatives ont été faites, en particulier par N. Martin et ses élèves, Howell et Donaldson (4), pour répéter sur les cœurs isolés de mammifères ce genre d'expériences qui n'avaient été pratiquées encore que sur

(1) *Travaux du laborat.* de Marey. M, t. IV, p. 167. — Marey, *La Circulation du sang*, p. 73.
(2) *Arch. f. experim. Pathol.*, XXIV, p. 225, 1887.
(3) Voy. *Arch. f. experim. Pathol.*, 1881, t. XIII, p. 1.
(4) *Philosoph Transact.*, 1883, II, p. 666. — *Philosoph. Transact.*, 1884, p. 139. — Voy. aussi Langendorff, *Arch. de Pfluger.*, t. LXI, p. 291, 1895.

des cœurs de grenouille ou de tortue. La méthode de Martin consiste à sectionner tous les nerfs qui vont au cœur, à lier la veine cave inférieure ainsi que toutes les branches de la veine cave supérieure, à l'exception de la veine jugulaire d'un côté, à lier également toutes les branches de l'aorte à l'exception de la carotide droite et de l'aorte abdominale. Une canule placée dans la jugulaire sert à alimenter le cœur, une autre placée dans la carotide droite permet de mesurer la pression du sang, enfin une troisième introduite dans l'aorte abdominale est en rapport avec un tube, qu'on élève ou abaisse pour faire varier les résistances que le ventricule gauche rencontre à son évacuation.

Les mesures du travail du cœur n'ont que peu de valeur au point de vue absolu : elles tiennent surtout leur intérêt des renseignements qu'elles fournissent sur l'influence des diverses conditions qui peuvent modifier le travail du cœur. Nous devons nous borner à signaler brièvement les principaux résultats obtenus. En ce qui concerne l'influence de la charge veineuse, Marey a constaté sur le cœur de tortue qu'en élevant cette charge on obtient un accroissement du débit du cœur, d'abord proportionnel à la pression, puis moins prononcé, quand celle-ci dépasse un certain chiffre. Howell et Donaldson, dans leurs observations faites sur le cœur du chien, sont arrivés sur ce point à des conclusions qui diffèrent peu de celles de Marey.

Quant à l'influence de la pression artérielle sur le débit, Marey, Blasius, Dreser s'accordent à reconnaître que celui-ci diminue à mesure que celle-là augmente. Le produit du débit par la charge commence par croître jusqu'à une certaine charge, puis diminue, c'est-à-dire que le travail atteint son maximum pour une certaine charge moyenne (Marey). L'optimum est atteint pour une charge qui correspond précisément à la moitié de celle qui représente la force absolue du cœur (Dreser). Si, par exemple, la charge augmente de 0 à 40 centimètres et qu'à 40 centimètres le débit est devenu 0, l'optimum sera vers 20 centimètres.

Dans leurs expériences pléthysmographiques sur le chien, Johansson et Tigerstedt se sont également assurés que le débit du cœur diminue quand les résistances augmentent; à la condition toutefois que celles-ci atteignent une certaine valeur. Quand l'élévation de la pression artérielle n'est pas trop forte, la quantité de sang lancée par le cœur peut d'abord augmenter.

D'après la plupart des expérimentateurs, le travail du cœur croît avec la température jusqu'à une certaine limite (18 à 26°, Cyon), puis décroît. Cependant, d'après Flatow (1), il resterait sensiblement le même pour toutes les températures auxquelles l'organe est capable de se contracter.

Les méthodes qui servent à étudier le travail du cœur permettent aussi d'évaluer sa force absolue. Dans ce but, il suffit de déterminer la charge qui, agissant sur le muscle au moment de sa contraction, empêche son raccourcissement et est, par conséquent, en équilibre avec la force qu'il développe. Dans l'appareil de Marey, si l'on comprime le tube artériel en aval du manomètre, l'effort du ventricule fait monter la pression jusqu'à 11 et 12^{cm} Hg,

(1) *Arch. f. experim. Pathol.*, 1892, t. XXX, p. 363.

valeur qu'elle n'atteint jamais chez la tortue dans les conditions physiologiques. William a trouvé avec son appareil que le ventricule de la grenouille peut développer un effort maximum de 50 à 90^{mm} Hg, suivant les cas. Dans les expériences de Dreser, faites également sur la grenouille, la hauteur de la colonne de sang que le cœur n'arrivait plus à surmonter a varié de 35 à 75 centimètres.

CARDIOMYOGRAPHIE

Il nous reste encore à dire quelques mots de la myographie proprement dite du cœur ou cardiomyographie, qui a pour but d'étudier la contraction du muscle cardiaque en elle-même, sa nature, ses analogies et ses différences avec celle des autres muscles ; c'est, en général, le cœur excisé de grenouille ou de tortue qui fait l'objet de ces recherches. Les divers instruments qui servent à enregistrer la pulsation peuvent ainsi être utilisés à inscrire la courbe du cœur qui se contracte à vide. A ceux qui ont déjà été décrits, il faut encore ajouter la pince cardiaque de Gaskell (1), le myocardiographe de Chauveau (2).

On obtient également de bons résultats, même en opérant sur le cœur *in situ* par la méthode dite de suspension d'Engelmann (3). Un fin crochet de verre ou de métal est enfoncé à environ 1 ou 1,5 millimètre de la pointe du cœur. A ce crochet, on attache un fil portant à son extrémité un second crochet qui se raccorde à un levier approprié. Langendorff (4) avait déjà employé une méthode semblable. On se bornera ici à ces indications (5). L'étude de la nature de la contraction du cœur et des phénomènes électriques dont elle s'accompagne trouvera sa place dans la physiologie générale du muscle.

(1) *Philosoph. Transact.*, 1882, III, p. 993.
(2) Voy. Contejean, *Soc. de biol.*, 1894, p. 831,
(3) *Arch. de Pfluger.*, t. LII, p. 357.
(4) *Arch. f. Phys.*, 1884, Suppl., p. 1.
(5) Pour une bibliographie plus complète du mécanisme cardiaque, voy. Morat et Doyon, *Traité de physiol. : Circulation, calorification*, 1899.

CIRCULATION DU SANG DANS LES VAISSEAUX
PRESSION ET VITESSE, POULS ET SPHYGMOGRAPHIE

Par M. E. MEYER,

PROFESSEUR DE PHYSIOLOGIE A LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE NANCY.

CHAPITRE PREMIER

A. — NOTIONS GÉNÉRALES

Le système vasculaire, qui sert à la circulation du sang, comprend les artères, les capillaires et les veines.

Les artères permettent au sang, partant du cœur, organe central de propulsion, d'arriver à la périphérie; les capillaires, par leurs plus fins réseaux, favorisent le contact du sang avec les éléments anatomiques; les veines servent au retour du sang à son point de départ, le cœur.

Nous distinguerons donc dans la circulation vasculaire un courant efférent ou d'apport aux tissus, la circulation artérielle; un courant afférent ou de retour au cœur, la circulation veineuse; entre les deux courants, une nappe, véritable milieu intérieur (Cl. Bernard), dans lequel vivent les cellules, la circulation capillaire.

On appelle *grande circulation* (fig. 320) le cycle parcouru par un globule du sang qui, partant du ventricule gauche, traverse l'aorte, parcourt l'une de ses nombreuses subdivisions, chemine à travers un réseau capillaire où il prend part, avec le plasma qui le porte, aux actes de la nutrition générale, et revient, par une veine cave, supérieure ou inférieure, à l'oreillette droite. — On appelle *petite circulation* le cycle parcouru par ce même globule, qui, continuant son chemin, est lancé par le ventricule droit dans l'artère pulmonaire vers le poumon, traverse le réseau capillaire pulmonaire, d'où, après avoir pris part, avec le plasma dans lequel il flotte, à un travail nutritif particulier, l'hématose, il revient chargé d'oxygène à l'oreillette gauche.

La circulation n'est donc point une simple fonction mécanique de transport du sang; associée de la façon la plus intime aux actes de la nutrition élémentaire, elle est elle-même une fonction de nutrition, comme la digestion ou la respiration; elle coordonne, pour une grande part, avec les besoins de tous les éléments anatomiques, l'activité propre des cellules prépo-

sées au travail digestif, respiratoire, etc., et par le mouvement incessant qu'elle imprime au milieu intérieur, elle maintient à la fois l'équilibre nutritif du sang et celui de tous les tissus. Soumise elle-même à l'action régulatrice générale du système nerveux, la circulation est donc une fonction de nutrition qui coordonne, par les mouvements du milieu intérieur, tous les actes de la nutrition élémentaire.

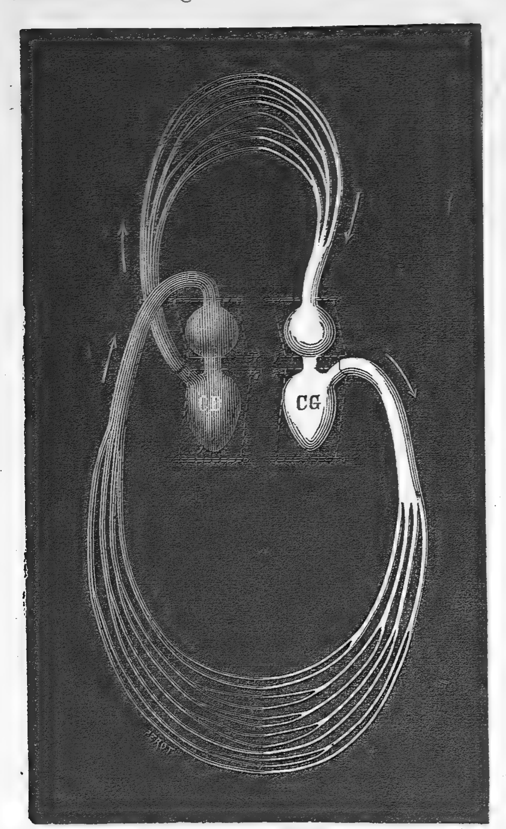


Fig. 320. — Reproduction théorique du trajet du sang d'après la doctrine de Harvey (*In* Marey. *Circulation du sang*).

On n'abordera dans cet article que d'une façon sommaire le rôle de la circulation dans les grandes fonctions, cette question paraissant mieux à sa place dans les Traités de physiologie ; on n'étudiera que le mode de progression du sang qui, sous l'influence de la poussée ventriculaire (Voy. *Cœur*), chemine dans les artères dans les capillaires (1), dans les veines.

B. — NOTIONS D'HYDRODYNAMIQUE APPLIQUÉES A LA CIRCULATION

Le sang poussé hors du ventricule gauche pénètre dans l'aorte : ce vaisseau, d'abord unique, ne tarde pas à se ramifier en un très grand nombre de branches artérielles et tout le système finit par se résoudre en un réseau, la nappe capillaire ; puis ce réseau se réunit de nouveau en troncs, de plus en plus volumineux, les veines, qui reviennent au cœur.

Il résulte de cette disposition que le système artériel peut être considéré comme formant un cône dont le sommet est au niveau du cœur (origine de l'aorte ou de l'artère pulmonaire), dont la base ou large surface se trouve au niveau des capillaires (généraux ou pulmonaires) ; l'ensemble va donc en s'élargissant, au moyen d'artères collatérales et de ramifications de plus en plus nombreuses du centre (le cœur) à la périphérie. — Une disposition inverse existe pour les veines.

Quelles sont les conditions de l'écoulement des liquides dans un pareil système ? Quels renseignements peuvent nous donner, dans le cas particulier qui nous occupe, les lois physiques de l'hydrodynamique ?

(1) Voy., pour la circulation capillaire, les articles Pléthysmographie et Vaso-moteurs.

1° Assimilons, pour un instant, le cœur à un récipient cylindrique plein de liquide. La pression exercée sur la base du cylindre est égale à la surface de cette base multipliée par la hauteur du liquide :

$$P = Bh.$$

2° On démontre en physique que la formule précédente est vraie, quelle que soit la forme du récipient. — Donc elle est vraie pour le cœur, dont la forme intérieure n'est pas celle du cylindre que nous avons supposé.

3° D'autre part, les parois du cœur ne sont pas rigides, comme celles du cylindre, mais tantôt relâchées (diastole), tantôt contractées (systole) ; cette systole provoque par elle-même une pression qui s'ajoute périodiquement à la pression exercée par le liquide contenu dans les cavités.

4° Vitesse d'écoulement. Nous supposons le cylindre, auquel par hypothèse nous assimilons le cœur, percé d'une ouverture. — On démontre, en physique, que l'écoulement se fera d'après la règle de Torricelli :

Vitesse (progression dans l'unité de temps) $= \sqrt{2gh}$.
g = accélération due à la pesanteur.
h = hauteur du liquide dans le récipient.

5° Si on connaît le diamètre de l'orifice, on pourra évaluer le volume du liquide qui s'échappe du récipient, en multipliant l'aire de la section de l'ouverture par la vitesse d'écoulement.

Il devra s'écouler :

$$\text{Vol} = \pi r^2 \sqrt{2gh}.$$

Or, à l'expérience, on observe que le volume évacué en réalité est inférieur à celui que la théorie indique. Ce résultat contradictoire est dû au frottement *intérieur* des molécules qui absorbent une partie de la force.

6° Dans le cœur, l'orifice donne naissance à un conduit au travers duquel le sang circule. — Que devient la vitesse d'écoulement dans un pareil système? Elle est encore moindre que dans le cas d'écoulement à l'air libre, car les frottements intérieurs des molécules font résistance sur une plus grande longueur, et une partie de la pression du liquide du réservoir est employée à vaincre ces résistances.

L'expérience (Daniel Bernouilli, 1738) montre qu'il y a décroissance de la pression dans le sens où se fait le courant.

Si l'on prend un tube d'écoulement portant de distance en distance des tubes perpendiculaires (*piézomètres ou mesureurs de pression*) (fig. 321), on voit que :

α. Le niveau est le même dans tous les piézomètres, si l'écoulement est empêché ;

β. Si l'écoulement est possible, les niveaux des piézomètres se modifient, et une ligne qui les réunirait formerait une droite dirigée de haut en bas, du réservoir à l'orifice d'écoulement.

La hauteur dans les tubes piézomètres indique pour chacun d'eux la pres-

sion latérale nécessaire pour vaincre les résistances dues au frottement à ce niveau.

Dans le cas de l'aorte, cette pression latérale équivaut à la pression du

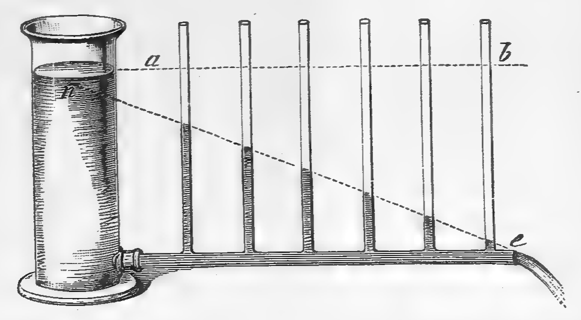


Fig. 321. — Décroissance de la pression dans les conduits de calibre régulier (Marey, *loc. cit.*)

sang au point considéré, et nous verrons que la pression artérielle latérale diminue dans le sens du courant.

7° Si nous supposons dans le tube d'écoulement une partie rétrécie, nous observerons une élévation des pressions latérales dans les piézomètres en

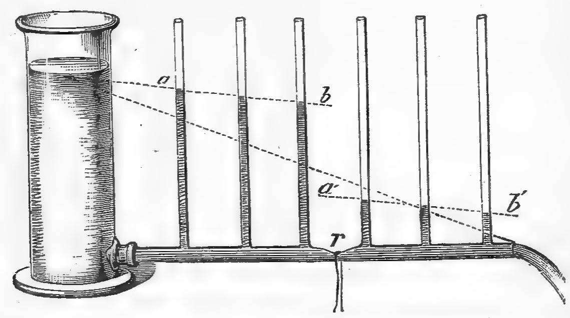


Fig. 322. — Répartition de la pression dans un tube inégalement calibré (Marey).

amont (fig. 322), un abaissement en aval. Si le tube est au contraire dilaté, on observerait une chute brusque avant chaque renflement.

Ce résultat s'explique si l'on veut bien songer que, les liquides étant incompressibles, chaque portion du tube doit laisser passer, quelle que soit sa largeur, la même quantité de liquide. Ce liquide passera plus vite par une section rétrécie, plus lentement par une section élargie; d'où cette conséquence, qui trouvera son application dans la circulation au niveau du réseau capillaire : la vitesse est en raison inverse de la section des conduits.

En résumé, l'existence d'un conduit faisant suite à l'orifice d'un récipient a pour conséquence le ralentissement de la vitesse d'écoulement (6) et l'apparition de pressions latérales, destinées à vaincre les résistances (7); en d'autres termes, la pression dans le récipient (H) est en partie absorbée par la pression latérale (h) provoquée par les résistances, et seule une fraction h'

de la pression totale reste disponible pour la progression du liquide (fig. 323).

Dans le cas d'écoulement en chute libre, la vitesse était donnée par la règle de Torricelli : $V = \sqrt{2gH}$; cette vitesse devient, lorsqu'il existe des

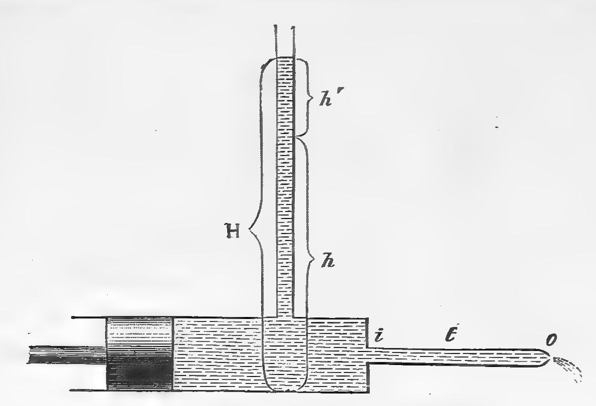


Fig. 323. (D'après A. Waller, *Physiologie.*)

conduits, $V' = \sqrt{2gh'}$, plus petite que V, h' étant lui-même plus petit que H.

L'exemple suivant, emprunté à A. Waller (1), servira à fixer les idées.

Soit une pression latérale dans une carotide de 14^{cm} Hg, et une vitesse du sang de 30 centimètres à la seconde.

Nous aurons :

$$V' = \sqrt{2gh'} = 0{,}30 \text{ m}.$$

$$h' = \frac{V'2}{2g} = \frac{30 \times 30}{19{,}6} = 0^{cm}{,}46 \text{ d'eau}$$

ou $0^{cm},035$ Hg.

La pression totale primitive H se sera donc subdivisée en deux parties :

$h = 14^{cm}$ Hg, pression latérale due aux résistances (pression artérielle) ;

$h' = 0^{cm},035$ Hg, pression utilisée pour la progression du liquide (vitesse du sang).

h' est le 1/400 de h : $\frac{h}{h'} = \frac{14}{0{,}035} = 400$.

D'autre part, la vitesse serait vingt fois plus forte si les résistances étaient nulles, si toute la pression latérale (h) absorbée par les frottements était utilisée à la propulsion du sang. La vitesse de 30 centimètres à la seconde dans la carotide intacte s'élèverait théoriquement à 600 centimètres par seconde dans une carotide sectionnée ; pratiquement, comme les résistances ne deviennent pas nulles par la section, et que la pression n'est pas constante, la vitesse dans la carotide sectionnée n'est que 5 à 10 fois plus forte.

Enfin le débit (5) est également différent dans une artère fermée ou sectionnée.

(1) A. Waller, *Physiologie*, 1898.

L'aire de la section d'une carotide étant $0^{c3},8$, le débit est

$$\text{Vol} = \pi r^2 \sqrt{2gh'} = 24^{c3} \text{ par seconde ;}$$

il devient, quand l'artère est sectionnée,

$$\pi r^2 \sqrt{2g\text{H}} = 120 \text{ à } 240^{c3} \text{ par seconde.}$$

8° On a vu que l'aorte ne tarde pas à se ramifier. L'existence d'un *embranchement* sur le tube principal constitue en définitive un élargissement de ce tube, et le débit augmente.

Cette augmentation (*a*) du débit est la même, quel que soit l'angle d'implantation du rameau latéral. Ainsi on a trouvé comme débit :

30557 G.	pour un embranchement à	45°
30643 G.	—	135°
30470 G.	—	160° (Jacobson) (1).

Par contre, la répartition (*b*) de la masse du liquide entre les deux branches dépend de l'angle d'inclinaison de l'embranchement. Plus l'angle est grand, moins grande est la quantité de liquide qui passe par l'embranchement.

9° Lorsque, au lieu d'un simple embranchement, le système possède une multitude de canaux plus petits que le tube d'arrivée, mais dont le volume total est plus grand que celui du tube primitif, il convient de tenir compte, à la fois, de l'élargissement, provoquant une diminution de vitesse qui est inversement proportionnelle à la section (7), mais aussi de l'augmentation des résistances, d'autant plus grandes que les subdivisions deviennent plus fines. L'état de la circulation dans un pareil système dépend de l'influence de ces facteurs antagonistes.

CHAPITRE II

CIRCULATION ARTÉRIELLE

Caractères de la circulation artérielle. — Les caractères de la circulation artérielle tiennent à la fois aux *propriétés des artères* (A) et aux *conditions mécaniques* (B) d'après lesquelles le cœur lance à chaque systole l'ondée ventriculaire dans des vaisseaux déjà remplis de sang.

A. — PROPRIÉTÉS DES ARTÈRES

Les artères, dont les tuniques moyennes renferment des fibres élastiques et des fibres musculaires lisses, sont élastiques (I) et contractiles (II). Les grosses artères sont surtout élastiques, les artères de moyen et de petit calibre sont surtout contractiles.

I. ***Les artères sont élastiques.*** — 1° CARACTÈRES. — L'élasticité est la

(1) *In* TIGERSTEDT-KREISLAUF, p. 314.

propriété que possède un corps, déformé par une cause quelconque, de revenir plus ou moins complètement, plus ou moins vite à sa position de repos (Voy. *Élasticité*). Cette propriété se manifeste dans les artères par l'*allongement* des tuniques sous l'influence d'un poids, par exemple, et par la *dilatation* ou *extension* de leur calibre sous l'influence d'une poussée intérieure.

a. **Allongement**. — L'allongement est d'autant moindre que le poids qui le provoque est devenu progressivement plus grand (Wertheim). Il faudra donc des poids qui devront croître plus rapidement que les allongements que l'on veut obtenir. — Le coefficient d'élasticité n'est donc pas constant, il augmente avec l'allongement déjà obtenu.

Mais ces expériences ne renseignent pas sur ce qui se passe quand la pression s'exerce dans tous les sens, et tend à produire la dilatation du vaisseau.

b. **Dilatation**. — Marey a mesuré les changements de volume d'artères soumises à des pressions intérieures graduellement croissantes (fig. 324 et

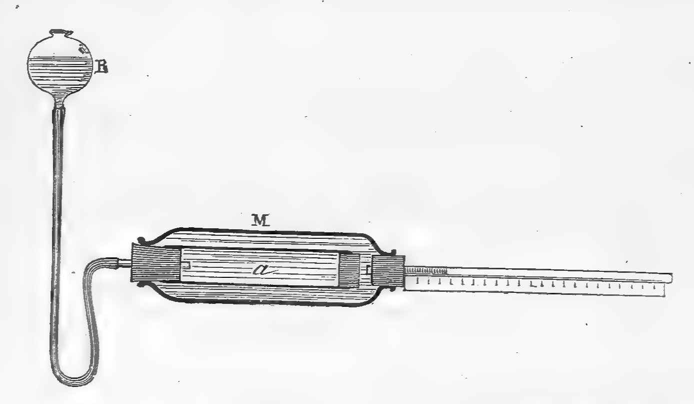


Fig. 324. — Appareil destiné à mesurer les changements de volume d'un tube élastique ou d'une artère, sous l'influence de pressions intérieures graduellement croissantes ou décroissantes (Marey).

325), et a toujours obtenu dans ces conditions des dilatations de moins en moins grandes. A mesure donc que la charge intérieure tend à dilater davantage le vaisseau, les parois de celui-ci résistent de plus en plus à l'extension. Cette résistance constitue la force élastique des artères, qui croît ainsi plus vite que la dilatation de ces vaisseaux; d'où cette conséquence importante : l'arrivée d'une quantité même minime de sang dans l'aorte déjà remplie augmente la force (force élastique) avec laquelle les parois pressent sur le sang, fait croître la tension artérielle.

c. **Résistance à la rupture**. — La résistance des artères à la rupture est très grande. Gréhant et Quinquand (1) ont vu qu'une carotide de chien pouvait supporter des charges de plusieurs mètres de mercure (3 à 8) avant d'éclater. La pression normale du sang variant de 16 à 20^{cm} Hg, la diffé-

(1) *Journ. de l'anat. et de la physiol.*, 1885.

rence est grande entre la limite d'élasticité des artères et les conditions physiologiques de la circulation.

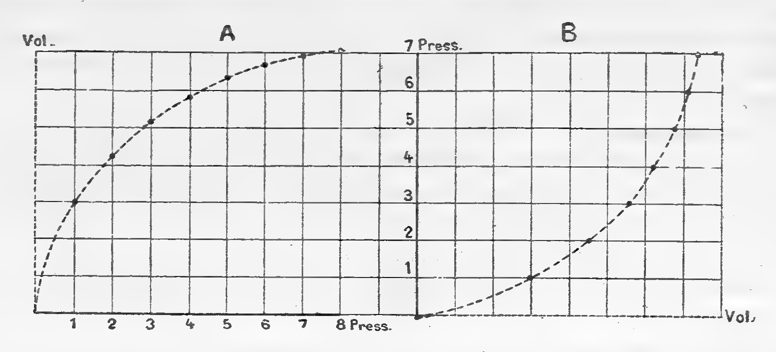


Fig. 325. — A, courbe des augmentations de volume d'une aorte soumise à des pressions intérieures régulièrement croissantes. — B, courbe des augmentations de volume d'un tube de caoutchouc soumis à des pressions intérieures régulièrement croissantes (Marey).

La résistance des petites artères est plus grande que celle des gros vaisseaux.

2° Rôle de l'élasticité. — *a*. **Circulation des liquides dans les conduits élastiques**. — α. *Uniformité*. — La circulation continue d'un liquide sous une pression constante, à travers des tubes élastiques, se fait d'après les mêmes lois que celles qui régissent l'écoulement dans des conduits rigides.

Si la circulation se fait, au contraire, sous des pressions qui varient d'une façon rythmique, l'intermittence du courant est modifiée.

Dans un tube rigide, l'intermittence des afflux provoquerait à l'orifice de sortie des jets discontinus; dans un tube élastique, au contraire, l'écoulement se fait d'une façon régulière et continue.

Une expérience très simple de Marey montre bien comment l'élasticité des conduits modifie le mouvement des liquides.

De l'ouverture inférieure d'un vase de Mariotte, d'où le liquide s'écoule sous pression constante (fig. 326), se détache un tube flexible, mais non élastique, terminé par une bifurcation; l'une des branches de la bifurcation porte un tube rigide, l'autre un tube élastique. Un levier compresseur permet de fermer les deux branches à la fois ; si on fait manœuvrer ce levier, on crée des afflux intermittents et l'on constate que le jet du tube rigide est saccadé, que celui du tube élastique est sensiblement uniforme.

En effet, les parois élastiques, qui peuvent être distendues, emmagasinent de la sorte une partie de la force impulsive qui provoque le mouvement de translation du liquide. Lorsque l'impulsion cesse, les parois, en vertu de leur élasticité, tendent à revenir sur elles-mêmes, mais ne peuvent le faire qu'en *restituant* au liquide qu'elles renferment une force égale à celle qui les a distendues. L'écoulement continuera donc, et si une nouvelle impulsion se produit avant le retour des parois à leur position de repos, le jet sera uniforme.

L'uniformité est d'autant plus grande que le tube élastique est lui-même plus long, que sa force élastique est plus grande. Cette conséquence, démontrée expérimentalement par Marey avec son appareil, se vérifie également dans la circulation; saccadé dans les grosses artères, le mouvement du sang passe par une série de types intermédiaires entre l'intermittence franche et l'uniformité parfaite (1).

β. *Augmentation du débit.* — L'élasticité des conduits diminue encore les résistances que les liquides éprouvent à pénétrer dans leur intérieur (Marey); en effet, le tube élastique débitera une quantité plus forte que le tube rigide

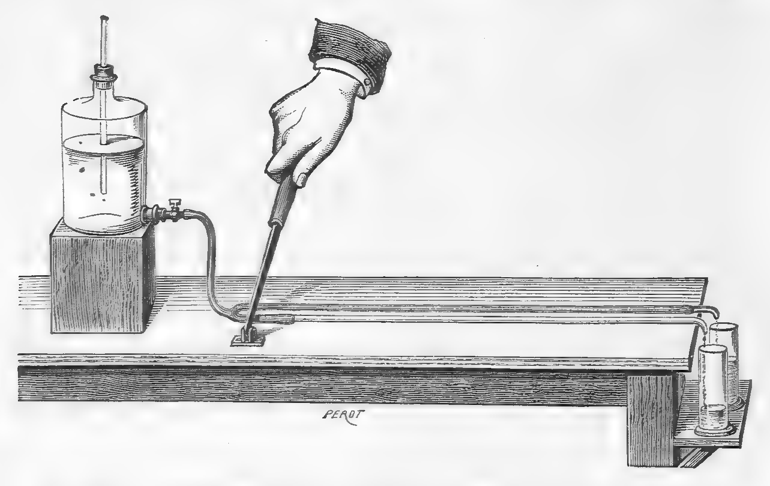


Fig. 326. — Expérience destinée à montrer comment l'élasticité des artères modifie le mouvement du sang (Marey).

pour un même afflux intermittent, ce qui s'explique par une facilité plus grande de pénétration dans le tube élastique.

L'expérience permet d'ailleurs de démontrer ce fait. En effet, pendant que l'on provoque les afflux intermittents, on observe le tube supérieur de l'appareil (fig. 326) par lequel rentre l'air. On voit alors les bulles d'air rentrer une à une pendant l'écoulement intermittent à travers le tube rigide; par bouffées, au contraire, au début du passage du jet saccadé à travers le tube élastique (Marey).

La circulation dans des conduits élastiques est donc uniforme et plus facile.

b. **Rôle de l'élasticité artérielle.** — Ces quelques considérations sont immédiatement applicables à la circulation artérielle.

Si on coupe une grosse artère, le jet de sang qui s'en échappe est saccadé, suivant un rythme égal à celui du cœur. — Les artères, malgré leur élasticité, n'ont pas encore pu rendre l'écoulement uniforme, à cause de la proximité du cœur. Cependant, si le jet n'est pas uniforme, il est déjà continu.

(1) Marey, *Circulation*, p. 164.

Si on blesse une petite artériole périphérique, on constate que l'hémorragie est déjà beaucoup plus uniforme, bien qu'il existe encore des renforcements synchrones avec les mouvements du cœur.

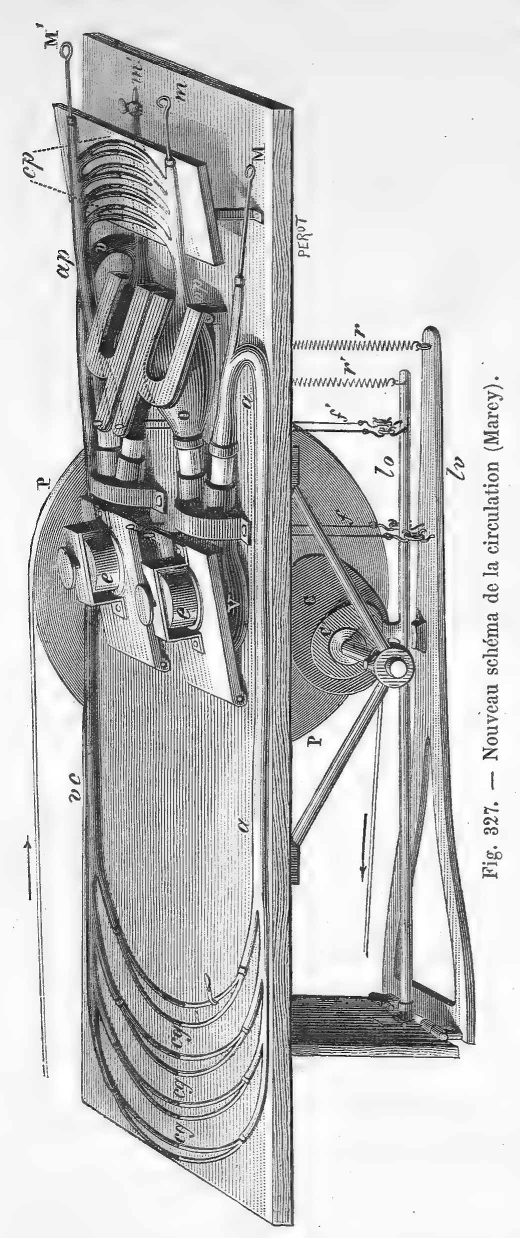


Fig. 327. — Nouveau schéma de la circulation (Marey).

Enfin, si on étudie, sous le microscope, la circulation dans la membrane interdigitale de la grenouille, ou dans le poumon au moyen de l'appareil de Holmgreen, on voit que le cours du sang, légèrement intermittent dans les petites artérioles, devient complètement uniforme dans les plus petites ramifications.

Cette démonstration peut être donnée également au moyen des schémas de la circulation, dont un des plus complets est celui de Marey (fig. 327).

Une poche élastique représente le cœur avec ses quatre cavités ; une série de tubes élastiques remplace les vaisseaux et leurs ramifications ; des valvules déterminent le sens du courant. Si les tubes élastiques sont assez longs, le jet qui s'en échappe est uniforme et continu.

Les artères régularisent donc le cours du sang ; de plus, elles le favorisent, et, par voie de conséquence, leur élasticité diminue l'effort demandé au cœur.

En effet, les artères en se distendant logent une plus grande quantité de sang et donnent ainsi, comme dans l'expérience avec les tubes élastiques (Voy. fig. 326), un débit plus fort.

D'autre part, la distension des parois artérielles se fait sous l'effort de la poussée ventriculaire. Si cette distension n'était pas possible, le cœur devrait,

à chaque systole, déplacer la masse entière du sang et surmonter ainsi des résistances considérables.

Grâce à leur élasticité, les artères en se distendant emmagasinent, en même temps qu'une plus grande quantité de sang, une partie de la force systolique ; quand l'impulsion cardiaque cesse, les artères reviennent sur elles-mêmes, en vertu de leur force élastique, et font encore progresser le sang pendant le repos du cœur. « Pour les artères, cette force élastique n'est que la restitution d'une force empruntée au cœur lui-même (Bérard) (1). » Grâce à cette restitution, la force entière que le cœur développe est utilisée à la progression du liquide, et le travail du moteur est favorisé.

La poussée ventriculaire se décompose donc en deux parties : 1° la force nécessaire à la projection de l'ondée systolique dans l'aorte et dans l'artère pulmonaire ; 2° la force nécessaire pour vaincre l'élasticité des vaisseaux ; cette dernière force est restituée à la circulation quand le cœur a fini sa systole.

II. ***Les artères sont contractiles.*** — 1° CARACTÈRES DE LA CONTRACTILITÉ ARTÉRIELLE. — La contractilité est la propriété que possèdent les artères de modifier leur calibre, grâce à l'activité de leurs fibres musculaires lisses. Ces fibres se trouvent dans un état de contraction moyenne qui peut augmenter (vaso-constriction) ou diminuer (vaso-dilatation).

Hunter, le premier, a montré expérimentalement les variations de volume des artères; Henle, par la découverte des fibres musculaires dans les parois artérielles, a donné à l'expérimentation physiologique son substratum anatomique.

Les caractères de la contractilité vasculaire sont ceux de l'activité des fibres musculaires lisses; celles-ci ont besoin d'une excitation plus longue que les fibres striées; leur raccourcissement s'établit plus lentement, mais il dure plus longtemps que l'excitation. La contractilité vasculaire est sous la dépendance de nerfs spéciaux, les nerfs vaso-moteurs, découverts par Schiff, Cl. Bernard, Brown-Séquard, et bien étudiés depuis par Eckardt, Lépine, Vulpian, Jolyet et Laffont, mais surtout par Dastre et Morat, dont les recherches ont abouti à la systématisation de ces nerfs (Voy. *Vaso-moteurs*).

2° RÔLE DE LA CONTRACTILITÉ ARTÉRIELLE. — La contractilité artérielle influe directement sur la mécanique circulatoire ; la facilité plus ou moins grande de la pénétration du sang dans les réseaux capillaires dépend des variations dans l'activité des fibres musculaires des vaisseaux; la pression artérielle est, pour une large part, sous la dépendance de ces variations. — Mais, étudier la contractilité vasculaire en elle-même, c'est faire l'étude physiologique du système nerveux vaso-moteur, étude qui ne rentre pas dans le sujet de cet article.

(1) MAREY, *Circulation*, p. 165.

B. — CONDITIONS MÉCANIQUES DE LA CIRCULATION ARTÉRIELLE

Pour nous rendre compte des conditions dans lesquelles se fait la circulation artérielle, découvrons, chez l'animal vivant, une artère carotide.

Nous verrons, tout d'abord, que ce vaisseau, distendu par le sang, se déplace par de petites saccades rythmiques; si nous le prenons entre les doigts et si nous le déprimons légèrement, nous sentirons un battement. Si nous l'incisons, nous verrons qu'il s'en échappe un violent jet de sang, qui s'élève à une certaine hauteur avec des renforcements rythmiques. Nous constaterons aussi que le courant de sang est dirigé du cœur vers la périphérie (Harvey). Comme un liquide se déplace toujours suivant le sens de la moindre pression, nous pourrons déjà conclure qu'il existe dans l'appareil artériel des différences de pression, et que ces différences sont provoquées par l'activité du cœur.

Pour mieux déterminer le phénomène, réalisons, pour l'appareil de la circulation, une expérience analogue à celle que nous avons faite en branchant sur un conduit un tube latéral (Voy. fig. 321); plaçons, dans un conduit artériel, un tube de verre qui formera ainsi un véritable piézomètre; nous répéterons de la sorte l'expérience classique et si démonstrative faite pour la première fois par Hales (1733).

Expérience de Hales. — Un tube de 3 mètres de hauteur environ est fixé par une ligature dans l'artère, du côté du cœur. Aussitôt qu'on établit la communication entre l'artère et le tube, « le sang commença à s'élever dans le tube vertical, jusqu'à ce qu'il fut arrivé à huit pieds trois pouces de la surface du ventricule gauche... Mais le sang n'arriva pas immédiatement et en une seule fois à une pareille hauteur; en une seconde, il fit la moitié du chemin, et ensuite s'éleva par degrés inégaux de huit, six, quatre, deux pouces, et finalement de un pouce. Quand il eut atteint sa plus grande hauteur, il s'éleva et s'abaissa de deux, trois, quatre pouces. Parfois, on le vit tomber de douze ou de quatorze pouces, et alors il oscillait, à chaque pulsation du cœur, comme précédemment, quand il était à son niveau le plus élevé, qu'il atteignait de nouveau après quarante ou cinquante pulsations ».

Il n'y a rien à ajouter à cette citation de Hales, que je traduis d'après le texte allemand qu'en donne Tigerstedt (1). Cette expérience montre, autant que la simple observation *de visu* le permet, mais de la façon la plus démonstrative, tous les caractères essentiels de la circulation artérielle. Le sang s'élève à un niveau fort élevé dans le tube ou piézomètre : c'est l'indication d'une *pression artérielle* latérale; mais il n'atteint pas d'un coup à sa plus grande hauteur : il est donc projeté avec une certaine *vitesse*, qui peut être mesurée; il ne reste pas d'une façon uniforme à la même élévation : l'extrémité libre de la colonne *oscille* et présente des *variations*. Enfin, on aperçoit l'influence des ondées ventriculaires, les *pulsations*.

Cette expérience classique, et si facile à répéter, nous indique de la sorte

(1) Hales, *Statick des Geblütes*, trad. allemande. Halle, 1748. — *In* Tigerstedt-Kreislauf.

les points principaux que des méthodes plus perfectionnées ont permis de mieux préciser plus tard, et nous montre qu'il y a lieu d'étudier dans la circulation artérielle, la *pression*, la *vitesse*, le *pouls*.

CHAPITRE III

PRESSION ARTÉRIELLE

A. — MOYENS D'ÉTUDE

I. *Appareils.* — L'appareil de Hales présente trois inconvénients : rien n'empêche la coagulation du sang ; la pression ne peut s'élever dans le tube qu'au moyen d'une véritable hémorragie qui trouble les conditions physiologiques ; enfin, l'observation précise des détails y est impossible.

1° Hémodynamomètre de Poiseuille. — Poiseuille substitua au tube droit

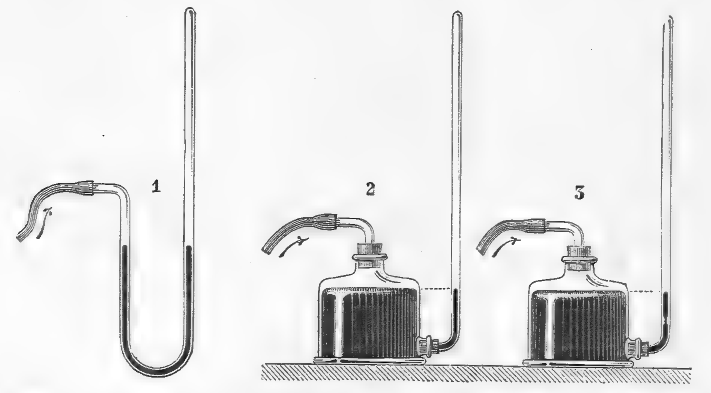


Fig. 328. — Différentes espèces de manomètres. — 1. Manomètre de Poiseuille. — 2. Manomètre de Guettet. — 3. Manomètre compensateur (Marey).

de Hales un tube en U (fig. 328, *1*) dans lequel se trouvait une certaine quantité de mercure. Le sang presse d'un côté, le mercure de l'autre branche est libre, et peut s'élever proportionnellement à la poussée du sang. — La densité du mercure étant beaucoup plus grande que celle du sang, les variations de la colonne mercurielle sont moins amples et plus faciles à observer que dans le tube de Hales. La lecture se fait en mesurant l'intervalle qui sépare les ménisques de la branche vasculaire et de la branche libre. L'animal ne perd qu'une quantité de sang insignifiante.

2° Hémodynamomètre de Guettet, cardiomètre de Magendie. — Le sang est en rapport avec une large surface (fig. 328, *2*), avec laquelle communique un tube manométrique droit, dans lequel, par conséquent, les variations sont sensiblement le double de celles de l'hémodynamomètre de Poiseuille. Mais, comme le niveau de la large surface se déplace aussi, très légèrement il est vrai, le zéro de l'appareil est variable.

3° Manomètre compensateur (fig. 328, 3). — L'inertie du mercure produit des oscillations propres qui faussent la valeur de la pression réelle. Pour remédier à cet inconvénient, Marey a fait rétrécir légèrement le tube manométrique ; cet étranglement supprime les oscillations propres et la colonne de mercure n'indique plus que la moyenne des variations de pression. Un manomètre de ce genre est très utile quand on l'annexe à un sphygmoscope.

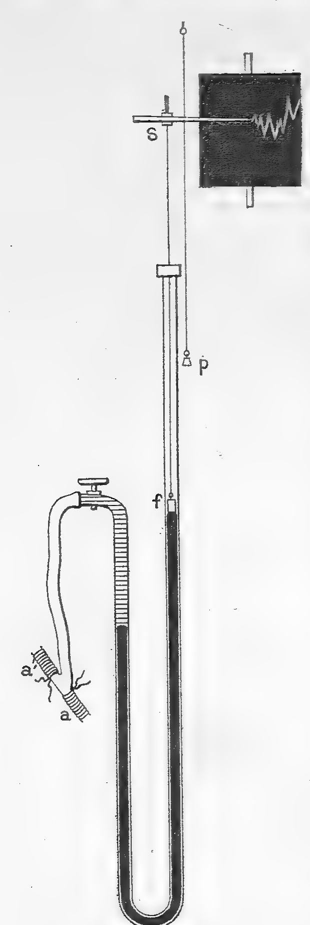


Fig. 329. — Kymographe de C. Ludwig (Viault et Jolyet, *Physiologie humaine*).

4° Appareils enregistreurs. — Mais les progrès de l'hémodynamique ne sont devenus rapides que du jour où Ludwig a introduit la méthode graphique dans les recherches physiologiques, en inscrivant sur un cylindre animé d'un mouvement de rotation, au moyen d'un flotteur surmonté d'une tige, les oscillations du mercure de la branche libre de l'instrument de Poiseuille. C'est là la première application de la méthode graphique qui a reçu de tous côtés, et notamment de Marey, des développements considérables.

Les appareils enregistreurs de la tension artérielle peuvent se partager en deux groupes : α) les appareils à déplacement libre de mercure (ou d'un autre liquide dans quelques circonstances spéciales : pression veineuse, etc.), *manomètres à mercure* ; β) les appareils à déplacement d'un liquide maintenu par une paroi élastique, *manomètres élastiques.*

α. *Manomètres à mercure.* — Ces appareils dérivent du *kymographion* de Ludwig, qui est un hémodynamomètre de Poiseuille muni d'un flotteur (fig. 329). Une augmentation de pression dans le sang agira sur le mercure de la branche vasculaire et sur celui de la branche libre ; à la lecture, la différence des niveaux pour une augmentation de 1 centimètre est, entre les deux ménisques, de 1 centimètre, mais elle ne sera que de 1/2 centimètre dans chacune des branches observées isolément. Il en résulte que le flotteur de la branche libre n'inscrira qu'une élévation $\frac{n}{2}$ pour une augmentation de pression réelle de n centimètres. D'où la nécessité de doubler les hauteurs inscrites avec cet appareil sur le cylindre enregistreur (fig. 330).

Quelquefois, on ajoute un renflement sphérique (fig. 331) sur la branche vasculaire du manomètre, qui dérive alors de l'appareil de Guettet. Les oscillations sont plus prononcées, mais, comme il a été dit, il faut tenir compte, pour si faibles qu'ils soient, des déplacements du zéro.

Courbes. — Ces appareils inscrivent, sur le papier, noirci ou non, des cylindres, une courbe qui indique à la fois l'intensité du phénomène et sa durée.

En effet, soit dans l'hémodynamomètre une dénivellation (augmentation de pression) de 10 centimètres de Hg.

Dans un premier cas, le cylindre est immobile ; le flotteur s'élèvera de 10 demi-centimètres au-dessus du zéro repéré d'avance, et le style inscrip-

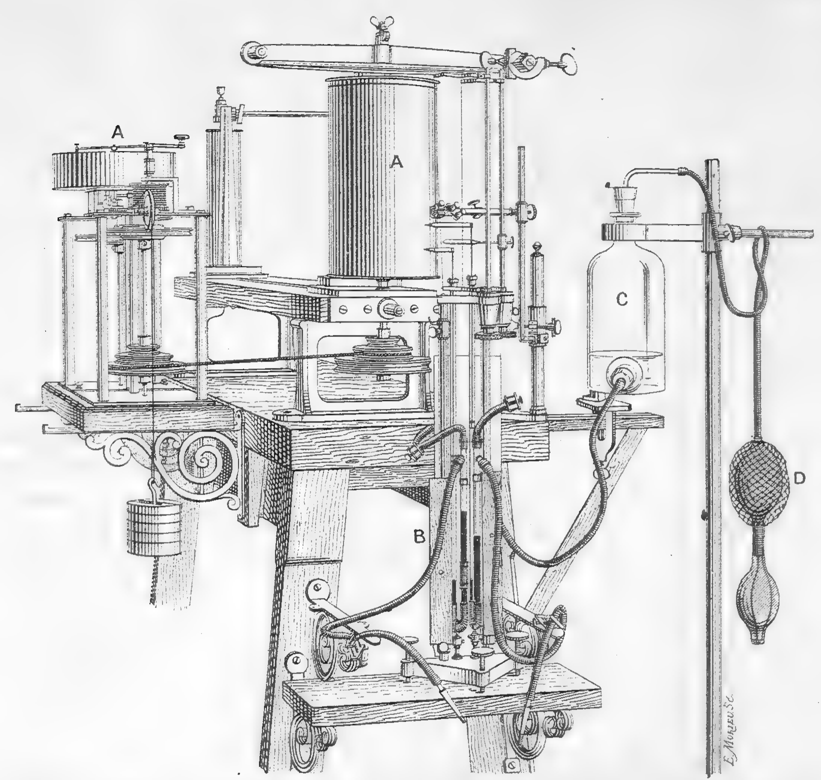


Fig. 330. — Appareil enregistreur de Marey modifié (A) et manomètre double à mercure de Fr. Franck (B). — Réservoir à solution de carbonate de soude (C) et soufflerie pour charger le manomètre (D).

teur tracera une droite d'égale valeur qui indiquera l'augmentation de pression dans l'appareil. — Cette droite prolongée à volonté sera la ligne des ordonnées Y (ligne des grandeurs) et, avec le manomètre à Hg, sera graduée en subdivisions du mètre.

Dans un deuxième cas, le cylindre tourne à une vitesse connue. Remettons le manomètre au zéro ; le style inscripteur tracera sur le papier qui se déplace devant lui une ligne horizontale, perpendiculaire à la première (X) et cette ligne, dans l'unité de temps, sera d'autant plus longue que la vitesse de rotation sera plus grande. Ce sera la ligne des abscisses ou du temps (fig. 333).

Faisons maintenant tourner le cylindre à la vitesse de 1 centimètre de déplacement de papier à la seconde, et reproduisons la dénivellation de 10 centimètres Hg. Au lieu d'une droite, nous aurons une courbe, dont les différents moments correspondent à la fois à un point de la ligne des ordonnées et à un point de la ligne des abscisses. Comme ces deux grandeurs sont connues, la courbe sera déterminée. Nous verrons, par exemple, que la courbe de l'augmentation de pression comprend une partie ascendante de 0 à 10 pendant cinq secondes, une partie descendante pendant cinq secondes ; que la durée totale du phénomène aura été de dix secondes ; qu'à la troisième seconde, la hauteur de l'ascension aura été de 8 centimètres Hg, etc., etc.

Les manomètres à mercure sont donc des appareils qui donnent tous, quels que soient les détails particuliers de leur construction, des indications qui sont comparables, l'unité de grandeur étant le centimètre de mercure.

Mais ils donnent des oscillations propres qui se surajoutent à celles du phénomène que l'on veut étudier ; ils nécessitent aussi l'inscription verticale, souvent plus compliquée. Chauveau a transformé le mouvement vertical du mercure de la branche libre en mouvement horizontal (fig. 333).

β, *Manomètres élastiques.* — 1° Le plus simple

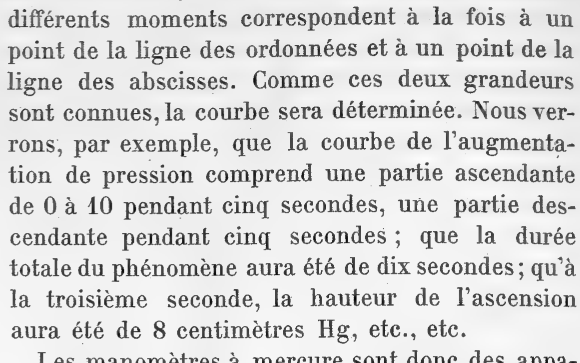


Fig. 331. — Manomètre inscripteur à mercure de François Franck (Beaunis, *Physiologie*).

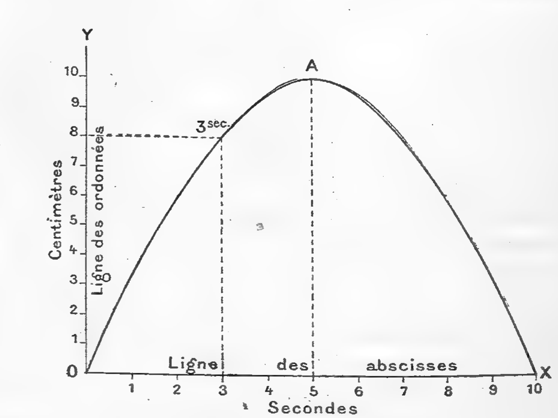


Fig. 332. — Schéma de courbe.

des manomètres élastiques est le *sphygmoscope* (Chauveau et Marey (fig. 334).

C'est essentiellement un doigtier en caoutchouc, fixé de manière à recevoir,

dans son intérieur plein de liquide, les poussées de la pression sanguine. Ce

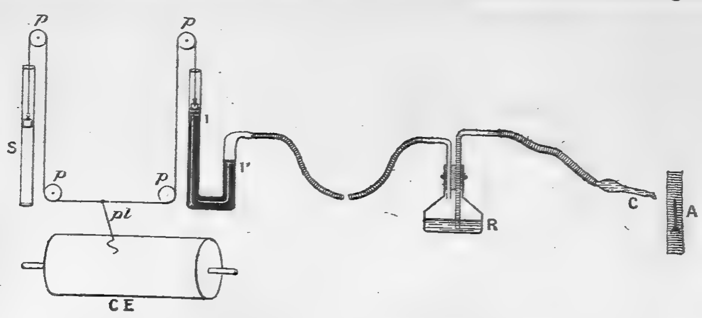


Fig. 333. — Schéma explicatif du manomètre Hg inscripteur de Chauveau.— 1,1', tube manométrique ; *p*, poulies soutenant un fil muni à l'une de ses extrémités d'un flotteur et à l'autre d'un poids tenseur S. Ce fil supporte une plume (*pl*) qui inscrit les variations de la pression sur un cylindre (CE). Une disposition qui n'est pas figurée donne à la plume la fixité nécessaire. (La plume porte en arrière un levier qui s'appuie sur un crin de cheval tendu d'une poulie à l'autre.) Le manomètre est en communication avec un réservoir (R) au moyen d'un tube très long de 1 millimètre au plus de diamètre. Le réservoir contient une solution saturée de sulfate de soude jusqu'à un certain niveau, de sorte que le manomètre n'est jamais en contact ni avec le sang ni avec le liquide anticoagulant. Le tube C qui fait communiquer le réservoir avec l'artère A doit être très court (20 centimètres) et assez large (8 à 10 millimètres) afin qu'il contienne une assez grande quantité de sulfate de soude (Morat et Doyon, *Traité de physiologie*).

doigtier se trouve, d'autre part, logé dans un cylindre de verre, dont il comprime ou dilate l'air ; ces modifications sont transmises à un tambour enregistreur.

Les formes que l'on a données à ces appareils sont diverses (Chauveau, Frédéricq, Hurthle, etc.) ; il y a avantage à intercaler entre le doigtier et l'artère un réservoir plein d'une solution de carbonate ou d'oxalate de soude (fig. 335).

2° L'*appareil de Fick* (fig. 336) est une autre forme de manomètre élastique. Le sang transmet ses variations de pression à une bande de baromètre de Bourdon dont les déplacements sont directement transmis par un système d'articulations à un levier enregistreur.

3° Le *manomètre élastique* (fig. 337) (sphygmoscope métallique) de Marey est une forme intermédiaire entre les deux précédentes. La pression du sang est transmise à une capsule de baromètre anéroïde dont les déplacements agissent sur une colonne d'eau. Les variations de hauteur de cette colonne sont transmises par l'air à un tambour enregistreur. Les manomètres élastiques n'indiquent pas la

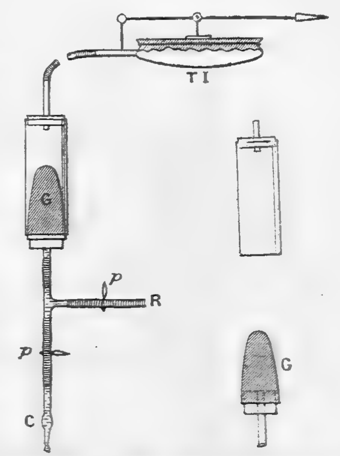


Fig. 334. — Sphygmoscope de Chauveau. — G, doigt de gant en caoutchouc ; C, canule destinée à être placée dans l'artère ; TI, tambour à levier ; R, tube permettant de remplir l'appareil d'un liquide anticoagulant ; *p*, pince à pression (Morat et Doyon, *loc. cit.*).

pression, comme les manomètres à mercure, d'après une unité commune. Chaque appareil a sa sensibilité propre, avec laquelle varie l'amplitude de ses indications.

Graduation. — Pour avoir des renseignements sur la valeur absolue (en centimètres de mercure) de la pression, il faut, ou conjuguer avec le sphygmoscope un manomètre à mercure, qu'on observera au moment voulu,

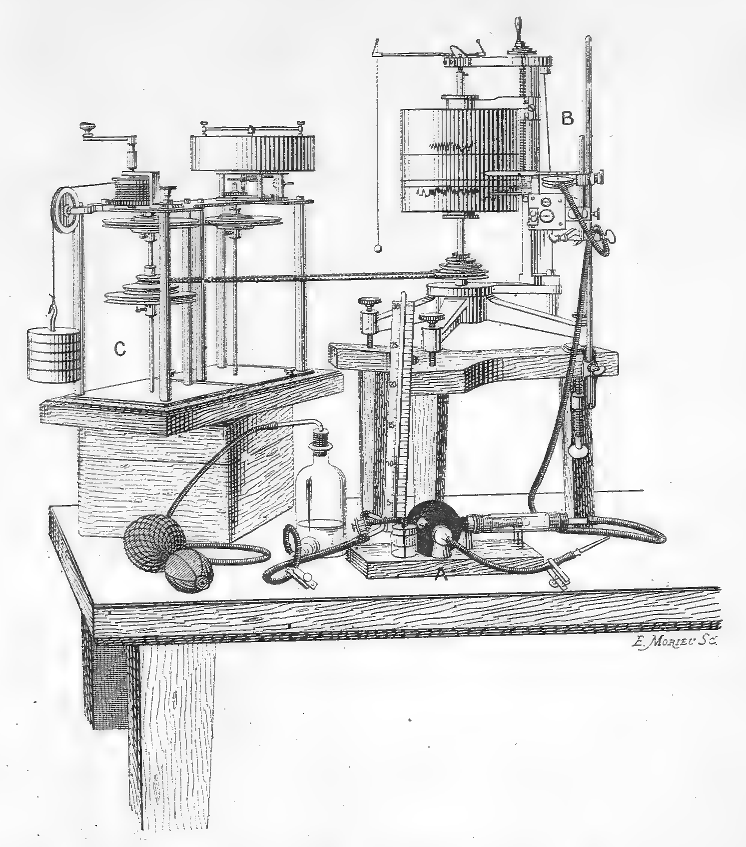


Fig. 335. — Sphygmoscope à réservoir (A). — Appareil enregistreur (B). — Moteur à poids indépendant (C).

ou bien graduer le sphygmoscope, avant l'expérience, en traçant la courbe de l'élasticité de sa membrane pour des pressions exactement mesurées avec un manomètre à Hg. L'inconstance de l'élasticité des membranes de caoutchouc nécessite une nouvelle graduation à chaque expérience.

Malgré ce léger inconvénient, les manomètres élastiques ont l'avantage de traduire fidèlement les variations relatives de la pression.

II. **Technique.** — 1° Préparation de l'artère. — Pour mesurer la pression dans une artère chez un animal, on découvre le vaisseau, on le dénude en respectant les organes voisins et on passe un fil au-dessous de l'artère. Trois

cas peuvent se présenter. On veut prendre la pression centrale : dans ce cas, on pose une ligature du côté périphérique, on oblitère momentanément, avec

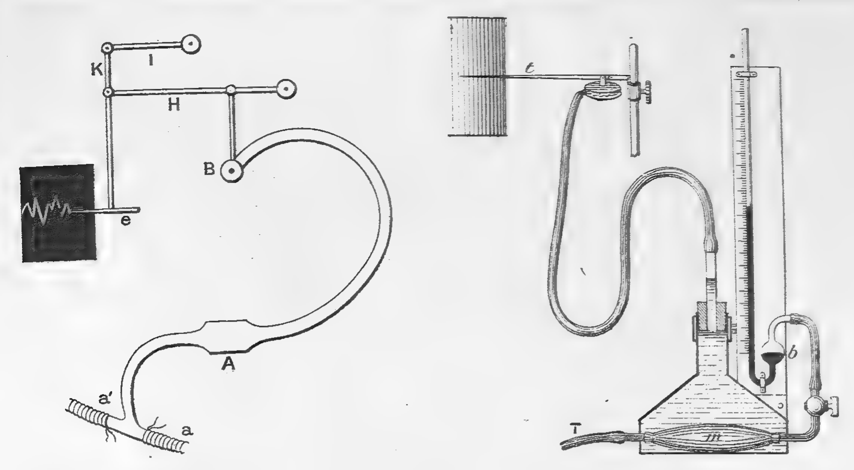
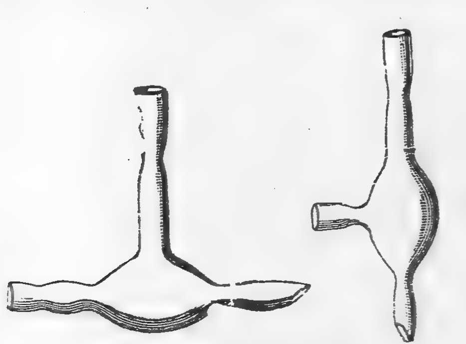


Fig. 336. — Kymographe à ressort de Fick (Viault et Jolyet, *loc. cit.*).

Fig. 337. — Manomètre métallique inscripteur de Marey. — *m*, capsule de baromètre anéroïde munie d'un tube afférent T en communication avec l'artère et d'un tube efférent qui se rend à un manomètre à mercure *b*; *t*, tambour à levier (Morat et Doyon, *loc. cit.*).

une serre-fine ou un fil, le vaisseau du côté du cœur et, d'un coup de ciseaux, on pratique dans les parois une boutonnière au travers de laquelle on introduira la canule artérielle (fig. 338 et 339), qu'on fixera par une solide ligature. Si l'on voulait prendre la pression périphérique ou la pression



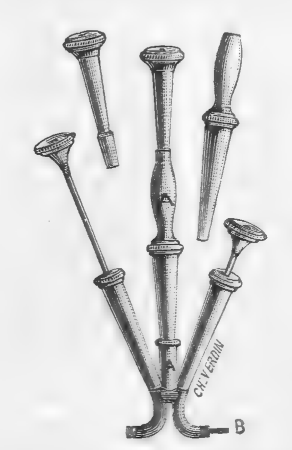


Fig. 338 et 339. — Canules en verre de Fr. Franck (Marey). Fig. 340. — Canule à pression latérale.

latérale, on ne poserait que des ligatures d'attente et on introduirait dans le vaisseau une canule ordinaire, mais dirigée vers la périphérie (pression périphérique) ou une canule en T (canule à pression latérale) (fig. 340).

2° Préparation du manomètre. — Pour éviter la coagulation, on interpose entre le sang et la surface élastique (mercure ou membrane) une colonne

d'une solution de carbonate de soude (D = 1,083) ou d'oxalate de soude saturé. Ce liquide, en se mélangeant dans le tube de communication avec le sang, en retarde la coagulation, surtout si tout le système est d'une propreté parfaite.

Pour éviter l'entrée dans le manomètre d'une trop grande quantité de sang, on *charge* le manomètre purgé d'air avant l'expérience, en le mettant à une pression égale à celle que l'on suppose exister chez l'animal (en moyenne 14 centimètres de mercure chez le chien). Cette mise sous pression se fait au moyen d'un ajutage latéral relié soit à une seringue, soit à un réservoir élevé, ou dont le liquide est chassé par une poire à compression (fig. 331 et 336). On évite de mettre l'appareil sous une trop forte pression, car l'entrée de la solution de carbonate de soude, surtout par la carotide, exposerait à des accidents souvent mortels (Fr. Franck) (1).

3° Il ne reste plus qu'à mettre en communication l'artère et l'appareil dont le tube de communication, court et large, doit se trouver au même niveau que le vaisseau.

B. — ÉTABLISSEMENT DE LA PRESSION ARTÉRIELLE

L'existence d'un moteur central, le cœur, les propriétés des vaisseaux, élastiques et contractiles, sans parler ici de la quantité de liquide qui doit se mouvoir dans l'appareil circulatoire, nous indiquent déjà quelles sont les conditions qui peuvent influer sur la pression artérielle. Pour les mettre en lumière, voyons comment s'établit la pression sanguine et analysons en détail l'expérience de Hales.

1° Action du cœur. Expérience. — Mettons la carotide d'un chien en communication avec un manomètre enregistreur et introduisons dans le cœur droit, par la veine jugulaire externe, une sonde cardiographique.

Nous aurons ainsi le double tracé de la pression artérielle et des impulsions cardiaques. Excitons alors par un courant induit, de moyenne intensité, le bout périphérique (cardiaque) du nerf pneumogastrique : nous provoquons un arrêt momentané du cœur, qui ne tardera pas à donner de nouvelles pulsations plus espacées, et nous pourrons ainsi étudier la part de cet organe dans l'établissement de la tension artérielle (fig. 341).

Aussitôt que le cœur est arrêté, le tracé tend à se rapprocher de la ligne du zéro, la pression baisse. Mais elle ne tombe pas brusquement à zéro, elle descend rapidement, mais graduellement ; la courbe de cet abaissement présente les mêmes caractères, mais en sens inverse, que ceux que Marey décrit à l'extension progressive des artères sous l'influence de charges intérieures croissantes (fig. 326).

Le sang n'étant plus renouvelé continue à s'écouler vers la périphérie, les artères distendues reviennent sur elles-mêmes : c'est la phase de la restitution au sang de la force impulsive, empruntée par les fibres élastiques des artères au muscle cardiaque ; c'est l'exagération, mais aussi la preuve de la restitution qui se produit normalement dans l'intervalle de deux systoles.

(1) Fr. Franck, *Trav. du laborat.* de M. Marey, 1877.

L'arrêt du cœur continue, la pression tombe à zéro; les artères, complètement revenues sur elles-mêmes, sont dans la position de repos, n'exercent plus aucune force élastique.

A ce moment, une ondée ventriculaire se produit; une pulsation lui corres-

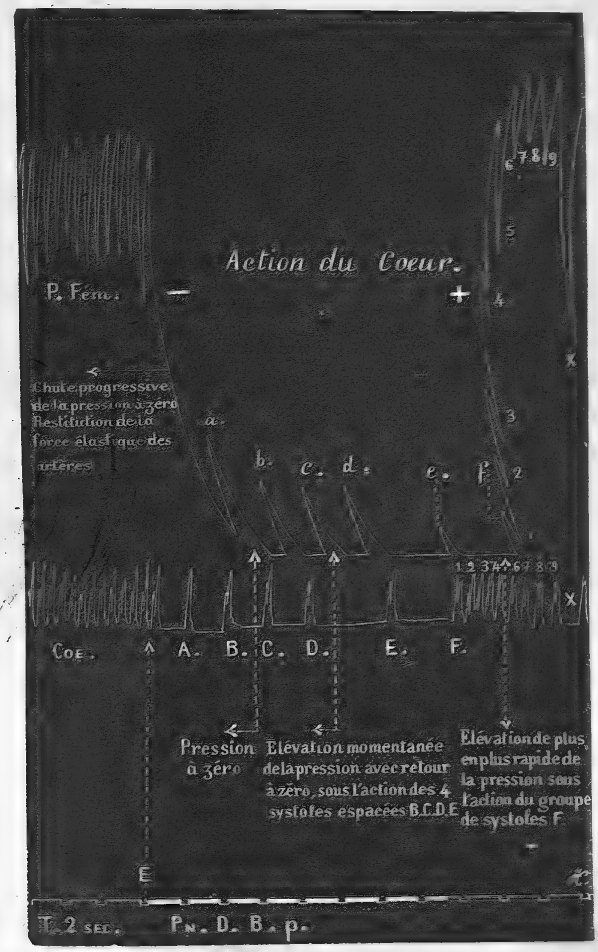


Fig. 341. — Action du cœur sur la pression artérielle. — Excitation du nerf pneumogastrique.

pond dans le tracé carotidien; mais la pression momentanément élevée ne tarde pas à retomber au zéro (B-*b*-C-*c*-D-*d*).

Plus loin (fig. 342), un groupe de systoles élève momentanément la pression; les trois pulsations carotidiennes qui leur correspondent prennent une forme ascendante sans retour au zéro; le retrait élastique des parois artérielles, en effet, n'était pas complet après la première ondée, quand une deuxième, puis une troisième systole sont venues augmenter et la masse du sang et l'exten-

sion de l'artère. Enfin le groupe des systoles F (fig. 341) (reprise des battements, fin de l'excitation) élève la pression au delà de son taux normal.

Si, sous l'influence des contractions précipitées, la pression s'élève si vite et si haut, c'est que, d'après les caractères de la distension des artères, nous savons que ces ondées augmentent de plus en plus la force élastique avec laquelle les parois pressent sur le sang, et que cette tension augmente aussi plus vite que la dilatation des vaisseaux. La pression monte ainsi au degré suffisant pour vaincre les résistances périphériques et permettre au sang de s'écouler.

L'analyse de cette expérience met bien ainsi en lumière le rôle du cœur et celui de l'élasticité artérielle.

Mais les artères, en se ramifiant à l'infini, augmentent les résistances à l'écoulement; nous savons d'ailleurs qu'elles peuvent modifier elles-mêmes leur calibre.

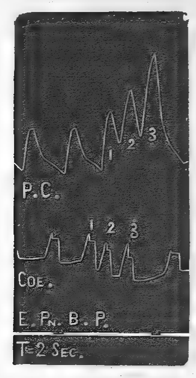


Fig. 342. — Action du cœur sur la pression artérielle (*Suite*).

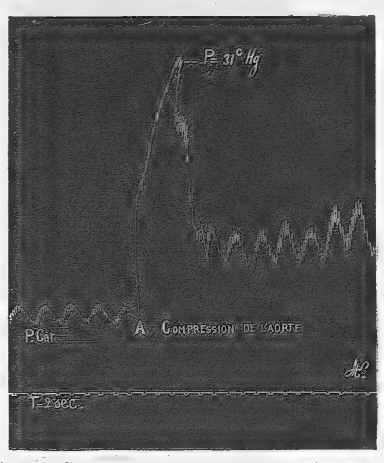


Fig. 343. — Compression de l'aorte. — Augmentation de la pression dans la carotide.

2° Résistances périphériques. — Abstraction faite de toutes les variations physiologiques de la pression, dont il sera question plus loin, il est facile de montrer que la hauteur à laquelle atteint la pression dépend aussi des résistances à l'écoulement. Il est facile de le montrer en portant ces résistances à l'extrême par la compression de l'aorte (fig. 343) au niveau du diaphragme, en supprimant ainsi la perméabilité de tout le réseau sous-diaphragmatique.

La pression s'élève brusquement (fig. 344) dans la carotide pendant qu'elle tombe à zéro dans l'artère fémorale; en F, on cesse la compression, on voit brusquement la tension se rétablir dans la fémorale et tomber dans la carotide. C'est là un effet purement vasculaire; dans l'exemple choisi, aucune modification ne s'est produite du côté du cœur.

La pression sanguine dépend donc essentiellement de deux facteurs : la force impulsive du cœur, la résistance à l'écoulement, agissant l'une et l'autre sur la force élastique des artères, qui presse sur la masse du sang.

— CARACTÈRES GRAPHIQUES DES COURBES DE PRESSION

1° Éléments. — On peut appeler *élément constant* de la pression la dis-

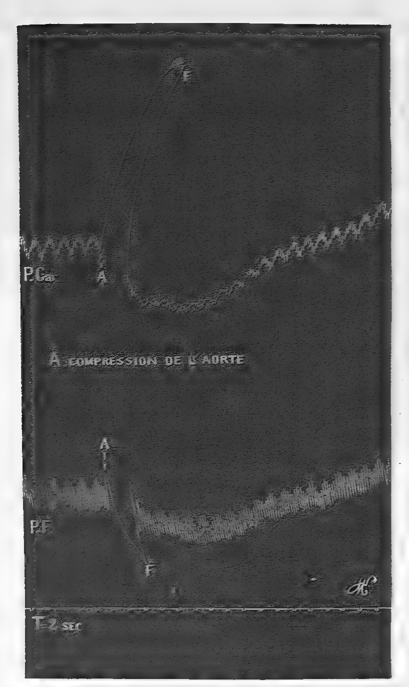


Fig. 344. — Compression de l'aorte au niveau du diaphragme. — Action sur la pression carotidienne et sur la pression fémorale.

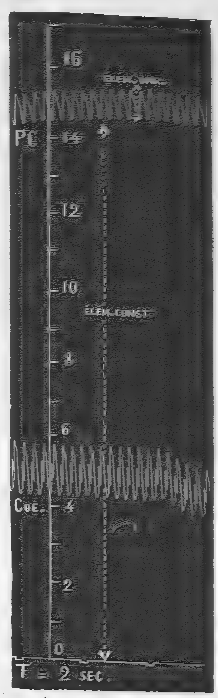


Fig. 345. — Élément constant et élément variable de la pression artérielle (P. C.). — Action du cœur (Cæ). — Oscillations de premier ordre.

tance qui sépare le zéro de la courbe de la base des oscillations supérieures, *élément variable* l'amplitude de ces mêmes oscillations (fig. 345). Dans la

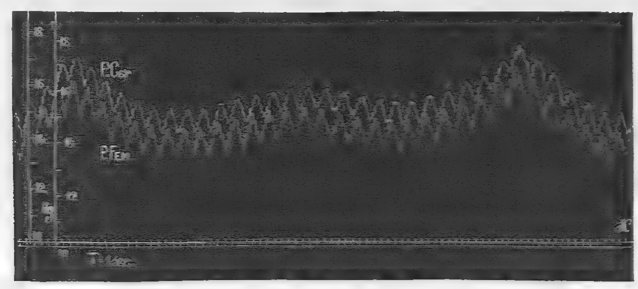


Fig. 346. — Tracés de pression carotidienne et de pression fémorale du chien inscrits simultanément.

figure 344 l'élévation subite de la courbe AF est une variation de l'élément constant, les oscillations F représentent l'élément variable.

La valeur de la pression artérielle est en moyenne de 10 à 18 centimètres de mercure chez les mammifères et chez l'homme; mais cette pression est soumise à des variations nombreuses dont on donnera plus loin quelques exemples.

La pression ne varie que très peu dans les gros troncs artériels (fig. 346); il

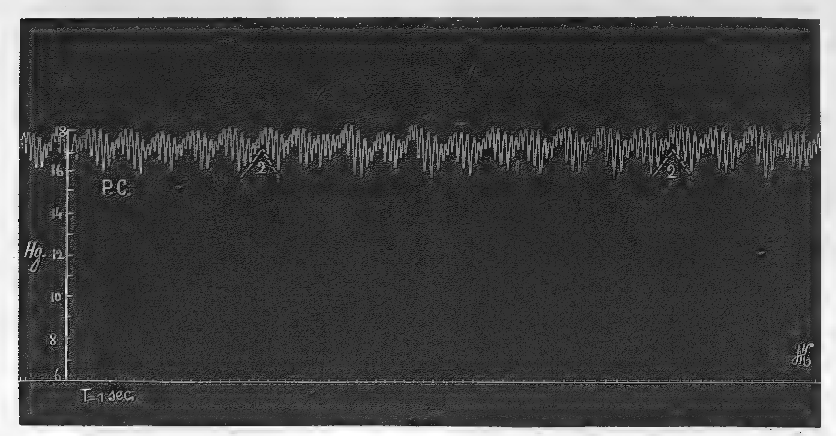


Fig. 347. — Oscillations respiratoires de la pression artérielle chez le chien. — Oscillations de deuxième ordre (2).

en est autrement dans les très petits conduits : ce résultat est en rapport avec la différence de résistance des uns et des autres.

2° Variations dans les courbes. — Les courbes de la pression présentent une série d'oscillations dont il importe de connaître la signification.

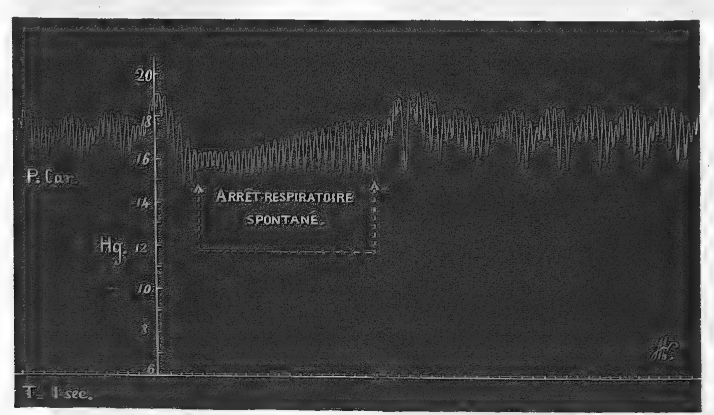


Fig. 348. — Oscillations respiratoires de la pression artérielle chez le chien.

On peut distinguer dans une courbe de pression artérielle trois ordres d'oscillations.

a. Des oscillations de premier ordre (fig. 345) dues à l'*impulsion cardiaque*, qui provoque un renforcement momentané de tension et dont l'explication a été donnée.

b. Des oscillations de second ordre, dues à l'influence de la respiration (*oscillations respiratoires* produites par des mécanismes divers), qui comprennent un nombre plus ou moins grand de pulsations du cœur (fig. 347 et 348).

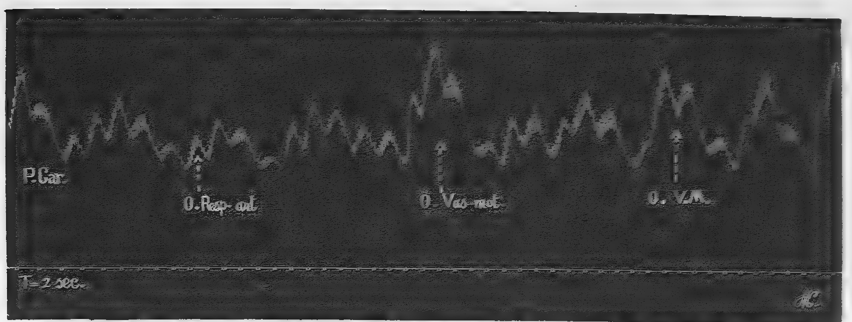


Fig. 349. — Oscillations vaso-motrices de la pression artérielle (P. *Car.*) chez le chien curarisé. — Oscillations respiratoires d'origine mécanique (respiration artificielle).

c. Des oscillations de troisième ordre, comprenant plusieurs courbes respiratoires (*oscillations vaso-motrices*, fig. 349).

Sans entrer dans le détail des considérations physiologiques qui peuvent expliquer la production de ces oscillations, et sans discuter le rôle des divers facteurs qui entrent en jeu, il est cependant possible de donner, d'une manière un peu schématique, une idée de ces variations.

Les oscillations respiratoires (*oscillations de second ordre*) sont ou d'origine mécanique, ou d'origine nerveuse.

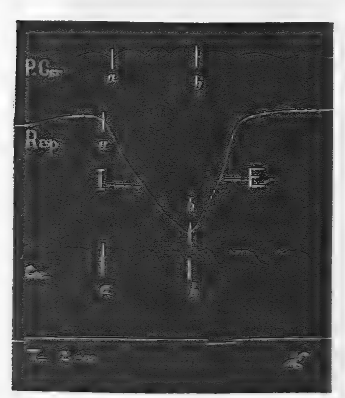


Fig. 350. — Influence de la respiration sur le rythme du cœur (Cœ) et sur la pression (P. *Car.*).

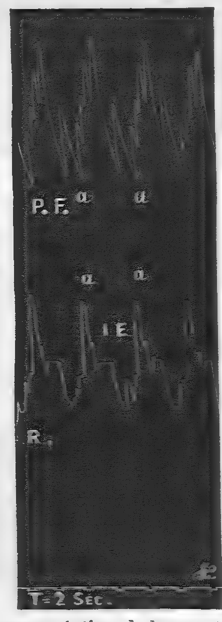


Fig. 351. — Augmentation de la pression fémorale (P. F.) pendant l'inspiration (I), par accélération du rythme du cœur.

Sont d'*origine mécanique*, les variations dues aux modifications de la

pression intrathoracique pendant la respiration, lorsqu'elles ne sont pas compensées par des influences antagonistes : inspiration, chute de la pression, expiration, augmentation de la pression; de même les oscillations de la pression observées chez les animaux soumis à l'insufflation pulmonaire, qui agit en sens inverse de la respiration normale (fig. 349).

Les oscillations respiratoires d'*origine nerveuse* proviennent de l'innervation cardiaque (*a*) ou de l'innervation vaso-motrice (*b*).

a. Chez l'homme, chez le chien, la pression monte à l'inspiration, baisse a l'expiration. Cet effet est dû à l'augmentation du rythme du cœur, provoquée par une inhibition momentanée du centre cardiaque modérateur sous l'influence de l'activité du centre bulbaire de la respiration. L'atropine, qui supprime l'action du nerf pneumogastrique, empêche également les effets de l'inspiration (fig. 350 et 351) (E. Wertheimer et E. Meyer).

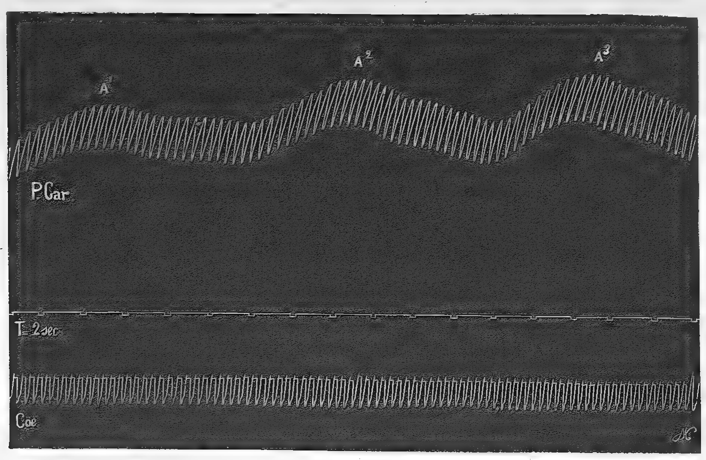


Fig. 352. — Oscillation vaso-motrice de la pression artérielle. Courbe de Sigm. Mayer. — A^1, A^2, A^3, oscillations respiratoires d'origine nerveuse. Courbes de Traube-Héring.

b. Lorsque l'effet du centre modérateur du cœur est ainsi supprimé, on observe des oscillations dans lesquelles l'inspiration s'accompagne d'une chute, l'expiration d'une élévation de la pression. Ces effets sont d'ordre nerveux; ils se produisent chez le chien curarisé ou chez le chien dont la cage thoracique a été réséquée (L. Frédéricq) pour supprimer tout effet mécanique. Ils paraissent liés à une association du centre respiratoire et du centre vasomoteur (fig. 352). Ce sont des oscillations respiratoires d'origine nerveuse, vaso-motrice, et, comme le fait remarquer L. Frédéricq, les véritables courbes décrites par Traube et Héring (*Travaux du laboratoire*, 1888, t. II) (fig. 352 et 353).

Ainsi donc, les oscillations respiratoires sont ou purement mécaniques, ou d'origine nerveuse; dans ce dernier cas, elles proviennent soit de l'innervation cardiaque, soit de l'innervation vaso-motrice, fonctionnellement associées dans le bulbe avec l'innervation centrale de la respiration.

Les oscillations de *troisième ordre* sont d'origine exclusivement nerveuse;

ce sont des courbes vaso-motrices spontanées (fig. 349). Elles prennent naissance chaque fois que, spontanément ou par une intervention expérimentale, les centres vaso-moteurs sont rythmiquement excités. Ces courbes sont étalées, se reproduisent quelquefois avec régularité, le plus souvent sans rythme bien constant; elles comprennent toujours plusieurs oscillations respiratoires (d'origine cardiaque ou d'origine vaso-motrice suivant le cas).

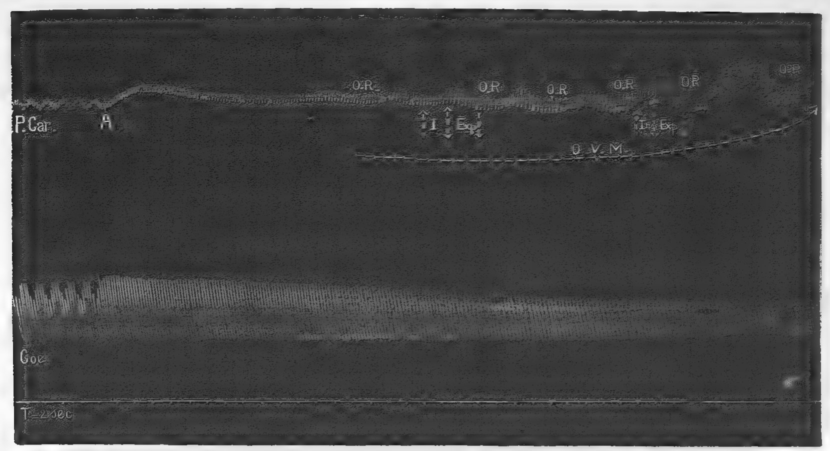


Fig. 353. — Grande oscillation vaso-motrice (O. V. M.) comprenant plusieurs oscillations respiratoires d'origine nerveuse (O. R.).

L. Frédéricq (*loc. cit.*), pour éviter toute confusion, propose de les appeler courbes de S. Mayer, du nom du physiologiste qui le premier les a découvertes (Voy. fig. 352 et 353).

D. — VARIATIONS DE LA PRESSION ARTÉRIELLE

La pression artérielle n'est pas toujours constante; elle varie dans des limites assez étendues, comme le prouve déjà l'analyse des courbes précédentes, comme le montre mieux encore l'étude des trois facteurs qui interviennent dans l'établissement de la pression : le cœur, les résistances périphériques, la masse du sang.

1° Cœur. — En l'absence d'autres influences concomitantes (fig. 350 et 351), l'augmentation ou la diminution d'activité du cœur (fréquence ou amplitude des systoles) amène une augmentation ou une baisse de la pression. Mais la fréquence et l'amplitude des systoles peuvent se combiner de telle sorte qu'il y ait, pour ainsi dire, compensation, et rien n'est changé dans la pression. L'augmentation de la pression dans l'aorte peut agir de son côté sur la fréquence des battements du cœur (Voy. *Cœur*), le volume de l'ondée, etc., et amener leur ralentissement et une certaine régulation de la pression par l'intervention du système nerveux modérateur du cœur. Enfin, la contractilité vasculaire peut, de son côté, compenser l'augmentation d'énnrgie du cœur, en relâchant les vaisseaux : une forte pression sur l'endocarde peut

amener la dilatation des vaisseaux abdominaux par excitation des filets du pneumogastrique ou du nerf dépresseur de Cyon ; la section des deux pneumogastriques, qui s'accompagne d'une accélération considérable des systoles et provoque habituellement une élévation notable de la pression, peut ne pas produire ce dernier effet lorsqu'elle s'accompagne de la section des deux nerfs splanchniques (dilatation des vaisseaux) (Fr. Franck). Il n'est donc pas possible dans la plupart des cas de préjuger de l'activité du cœur d'après l'état de la pression.

2° Résistances périphériques. — Rôle de la contractilité. — En modifiant le calibre des vaisseaux périphériques, le système nerveux vaso-

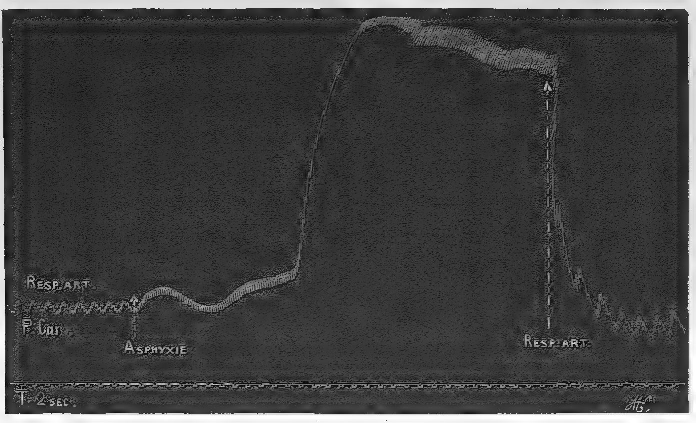


Fig. 354. — Augmentation de pression par excitation asphyxique.

moteur peut agir immédiatement et de la façon la plus efficace sur la valeur de la tension artérielle. Ce fait résulte déjà des lois de l'écoulement des liquides à travers des tubes rétrécis ou dilatés. Quelques exemples d'expérimentation sur l'animal le montreront encore mieux.

Une résistance à l'écoulement — vaso-constriction — se traduira par une augmentation de la pression. Nous savons que l'asphyxie est un excitant du système vaso-moteur et qu'elle produit, au début, une vaso-constriction des organes abdominaux accompagnée d'une dilatation des organes périphériques : la pression, mesurée par la carotide dans l'aorte, montre une augmentation énorme (fig. 354). — L'excitation du nerf de Cyon provoque la dilatation des vaisseaux de l'abdomen : chute de la pression. — L'excitation sensitive amène, par voie réflexe, une vaso-constriction : augmentation de la pression, malgré le ralentissement du cœur (fig. 356).

Il convient de faire remarquer que les tracés précédents ont été donnés pour montrer des effets connus pour être de nature vaso-motrice, et leur influence sur la pression artérielle ; mais que la simple mesure manométrique du sang ne permettrait pas d'affirmer la vaso-constriction ou la vaso-dilatation. Pour étudier les modifications vasculaires, il faut toujours associer les observations de la circulation artérielle à celles de la circulation veineuse.

L'intervention de la contractilité règle donc l'apport du sang aux tissus,

permet l'indépendance relative des circulations locales, et compense, par une dilatation dans une région, l'excès de pression par vaso-constriction dans une autre (balancement de la circulation cutanée et de la circulation viscérale dans l'asphyxie) (Dastre et Morat, Wertheimer).

3° MASSE DU SANG. — La masse du sang peut être modifiée expérimentalement par hémorragie ou par transfusion.

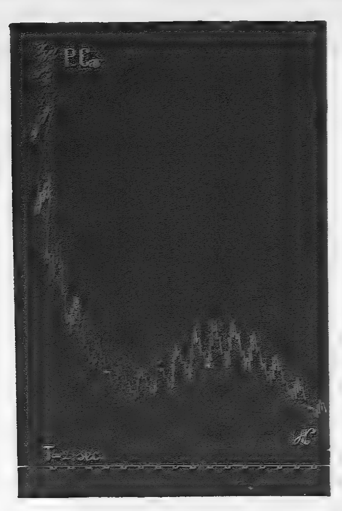


Fig. 355. — Chute de la pression carotidienne par vaso-dilatation.

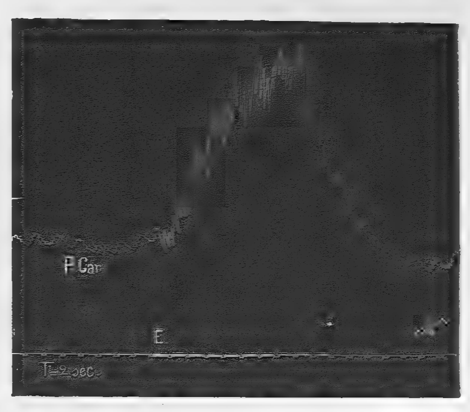


Fig. 356. — Augmentation de pression (P. *Car*. par excitation d'un nerf sensitif (E).

Une hémorragie de 1/5 de la masse totale du sang (Tappeiner), une transfusion, même abondante, n'élèvent que d'une façon passagère la tension artérielle (Magendie, Worm-Muller). La pression est donc relativement indépendante de la masse du sang par suite d'une espèce de régulation provoquée par les nerfs vaso-moteurs, d'une adaptation du calibre des vaisseaux à la masse du sang. — Quand la quantité de sang augmente, il se produit des transsudations et une augmentation des sécrétions. Pour une vitesse de transfusion déterminée, variable avec les animaux, Dastre et Loye ont vu que la sécrétion urinaire suivait une marche parallèle à l'injection veineuse d'une solution de chlorure de sodium. — Quand la quantité de sang diminue, au rétrécissement vasculaire vient s'ajouter la résorption des liquides interstitiels, que Klemensiewicz, d'après Tigerstedt (1), a observée directement sous le microscope chez la grenouille. Enfin, Tigerstedt et Johanson (2) font jouer un rôle à l'activité du cœur qui lance plus de sang lorsque la transfusion se fait lentement.

(1) KREISLAUF, p. 350.
(2) *Skand. Arch.*, 1889.

CHAPITRE IV

VITESSE DU SANG DANS LES ARTÈRES

A.

La vitesse du cours du sang est le chemin parcouru, dans l'unité de temps, par une molécule de ce liquide dans l'intérieur d'un conduit vasculaire. La détermination de cette valeur ne doit donc pas être confondue avec la *durée de la circulation* d'un globule à travers tout l'arbre vasculaire, durée dont la vitesse particulière à chaque segment est un facteur.

Pour déterminer cette vitesse du cours du sang, il ne suffit point de faire arriver le jet artériel dans un tube ouvert, et de mesurer le chemin parcouru, car la valeur de la vitesse est directement en rapport avec les résistances ; il faut, au contraire, modifier le moins possible les conditions normales de la circulation.

D'autre part, dans les artères où l'élasticité n'a pas encore rendu uniforme

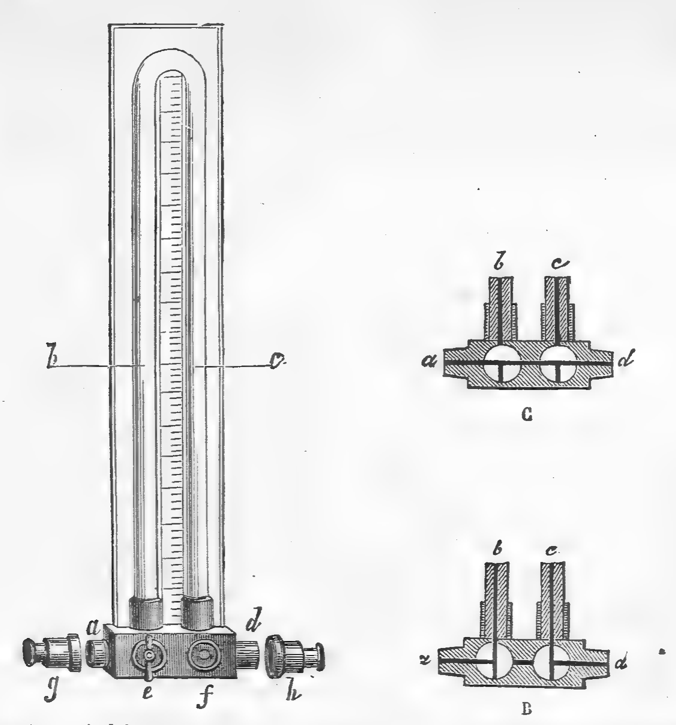


Fig. 357. — A, hémodromomètre de Volkmann ; B et C, disposition des robinets (Marey, *Circulation du sang*).

le cours du sang, les poussées ventriculaires produisent des renforcements de vitesse (augmentation de la pression de vitesse). De là la nécessité d'ap-

pareils spéciaux, dont les uns ont pour but l'étude du déplacement de la colonne de sang dans l'unité de temps (I) et les autres la détermination de la courbe de ce déplacement avec tous les éléments qui la caractérisent (II).

B. — MOYENS D'ÉTUDE

I. ***Mesure du déplacement du sang.*** — 1° Hémodromomètre de Volkmann (fig. 357). — Un tube de verre coudé, portant une graduation, est fixé sur le bout central (cardiaque) et le bout périphérique d'une artère. L'appareil est plein d'eau. Un système de robinets permet de faire passer le sang par le tube recourbé, ou directement à travers le tube rectiligne *a-d*. Une goutte d'huile sert d'index à l'orifice du tube recourbé.

Pour mesurer la vitesse, on fait passer le sang, on note les moments où le sang commence à pénétrer dans le tube de verre, et celui où il est arrivé à l'extrémité opposée.

2° Stromuhr de Ludwig (fig. 358). — L'appareil de Ludwig est un hémodromomètre perfectionné.

Deux ampoules, de volume rigoureusement égal, remplacent le tube recourbé. L'ampoule d'arrivée du sang est pleine d'huile (H), l'ampoule de sortie est remplie de sérum (S).

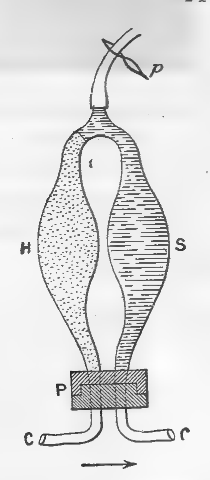


Fig. 358. — Appareil de Ludwig pour la mesure de la vitesse du sang (Stromuhr). — H, huile ; S, sérum ; P, pivot sur lequel tournent les deux ampoules ; *p*, pince à pression ; *cc*, canules placées dans l'artère (Morat et Doyon, *loc. cit.*).

Enfin, les deux ampoules peuvent pivoter autour d'un axe vertical, ce qui permet de faire plusieurs mensurations.

Expérience : Le sang, en pénétrant dans l'appareil, chasse l'huile devant lui, le sérum passe dans le bout périphérique de l'artère ; quand l'huile est arrivée à l'extrémité inférieure de l'ampoule S, on retourne l'appareil, en présentant cette ampoule S, au bout central de l'artère. Le sang qui remplit maintenant H passe dans le bout périphérique ; on continue jusqu'au moment où la coagulation arrête l'expérience.

Connaissant le volume des ampoules, le nombre de tours exécutés par l'appareil, la durée de l'expérience, on connaît la quantité de sang qui a passé pendant l'unité de temps.

On mesure la section de l'artère ; le volume débité Q devient :

$$Q = \pi r^2 \sqrt{2\,gh},$$

formule dans laquelle $\sqrt{2\,gh}$ représente la vitesse, c'est-à-dire l'inconnue.

On en tire : Vitesse $= \sqrt{2\,gh} = \dfrac{Q}{\pi r^2}$.

On trouve, dans ces conditions, que la vitesse dans la carotide ou la fémorale est en bloc de 30 à 40 centimètres par seconde ; mais nous n'avons

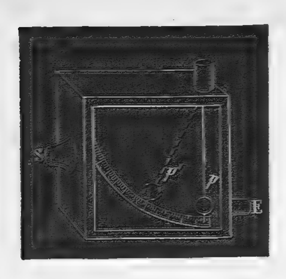


Fig. 359. — Hémotachomètre de Vierordt (Marey).

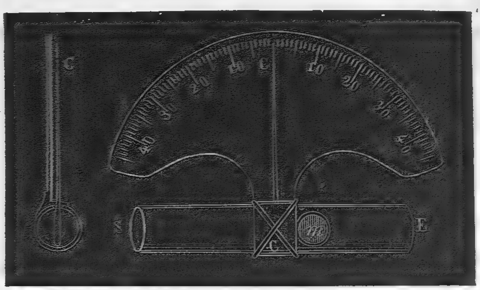


Fig. 360. — Ensemble de l'hémodromomètre de Chauveau (Marey).

aucun renseignement sur le mode de propagation du sang sur les renforcements ou les diminutions de vitesse.

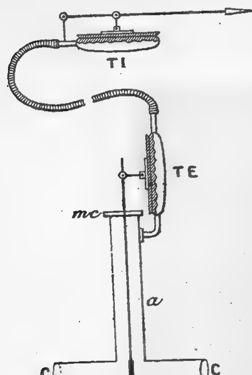


Fig. 361. — Schéma de l'hémodromographe de Chauveau. — C,C, canules placées dans l'artère; *a*, aiguille munie à son extrémité inférieure d'une palette ; *mc*, membrane de caoutchouc ; TE, tambour explorateur actionné par l'aiguille *a* ; TI, tambour inscripteur (Morat et Doyon, *loc. cit.*).

Ces renseignements sont fournis par la méthode des mesures des courbes ou variations de vitesse.

II. ***Mesure des courbes de la vitesse.*** — 1° Hémotachomètre de Vierordt (fig. 359). — Appareil basé sur le principe du pendule hydrostatique qui sert à mesurer la vitesse dans les cours d'eau. Le sang déplace une petite boule qui termine le pendule P, dont les déplacements indiquent les variations de vitesse.

2° Hémodromomètre et hémodromographe de Chauveau. — Un tube, au centre duquel se trouve une palette mobile, est fixé sur les deux bouts de l'artère. La palette se termine à l'extérieur par un levier qui oscille devant un cadran (fig. 360) (hémodromomètre), ou actionne un tambour récepteur dont les variations sont transmises à distance (hémodromographe) (fig. 361). L'échelle de l'appareil étant arbitraire, on le gradue en le faisant traverser par une série de courants, de vitesse variable et connue : les augmentations de vitesse donnent lieu à des dérivations de plus en plus grandes (fig. 364).

C. — CARACTÈRES GRAPHIQUES

1° Éléments : élément constant et élément variable de la vitesse. — Les courbes obtenues par cet appareil montrent que la vitesse, comme la pression, présente un élément constant, c'est-à-dire que les minima de la courbe (fig. 360) s'élèvent au-dessus de la ligne où la vitesse est nulle. A ce

élément constant, indiquant un courant continu, vient s'ajouter un élément variable, une augmentation de la vitesse, synchrone avec la systole cardiaque. Cet élément variable va en s'affaiblissant des gros troncs artériels vers les petits.

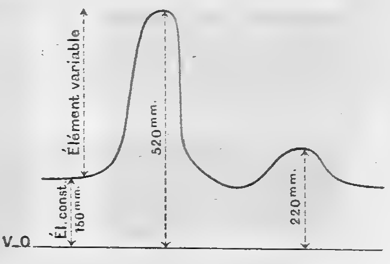


Fig. 362. — Éléments de la vitesse.

L'appareil peut quelquefois indiquer un courant (fig. 363) rétrograde. L'étude des tracés simultanés de la vitesse et de la pression montre que le maximum de la vitesse se produit plus rapidement que le maximum de la pulsation; lorsque ce dernier se produit, la vitesse commence déjà à diminuer (2). Un nouveau renforcement a lieu au moment du dicrotisme, et pendant la diastole la vitesse (élément constant) reste au-dessus de zéro (progression continue du sang). Exemple : carotide du cheval, systole, 520 millimètres par seconde; dicrotisme, 220 millimètres; systole, 150 millimètres (Chauveau). Ces

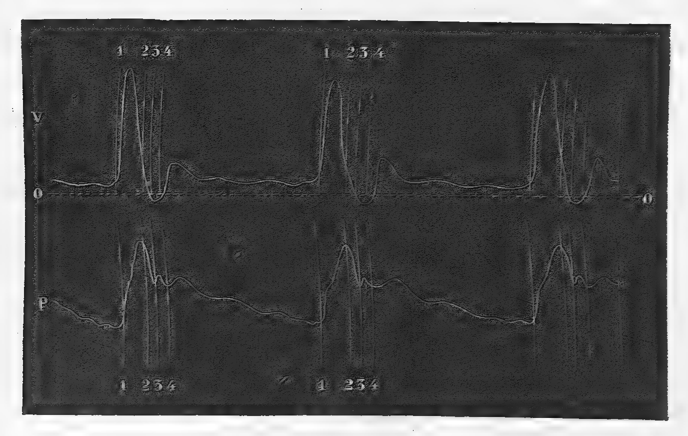


Fig. 363. — Tracés simultanés de la vitesse du sang V et de la pression P, recueillis simultanément. Des repères servent à déterminer le synchronisme des différents éléments de ces courbes (Marey).

150 millimètres représentent la vitesse de l'élément constant; les 520 millimètres de la systole et les 220 millimètres du dicrotisme donnent la mesure de l'élément variable aux périodes de renforcement (fig. 369).

2° Variations. — Les variations de la vitesse dépendent de la force impulsive du cœur et de la résistance que les petits vaisseaux opposent au courant sanguin. Quand le cœur augmente son action, toutes choses égales du côté des vaisseaux, la vitesse augmente, et réciproquement. Quand les résistances augmentent, l'action du cœur demeurant constante, la vitesse diminue, et réciproquement.

3° Variations corrélatives de la vitesse et de la pression. — Marey a montré que lorsque la pression augmente par suite d'une modification de la force

impulsive du cœur, la vitesse s'accélère, et réciproquement ; d'autre part, à une hausse de la pression par augmentation des résistances correspond une diminution de la vitesse et réciproquement. En d'autres termes, le cœur agissant seul produit sur la vitesse et la pression des variations simultanées et de même sens ; l'action des seuls obstacles périphériques se traduit par des variations simultanées, mais de sens contraire.

L'augmentation de la pression n'indiquera donc un phénomène de vaso-

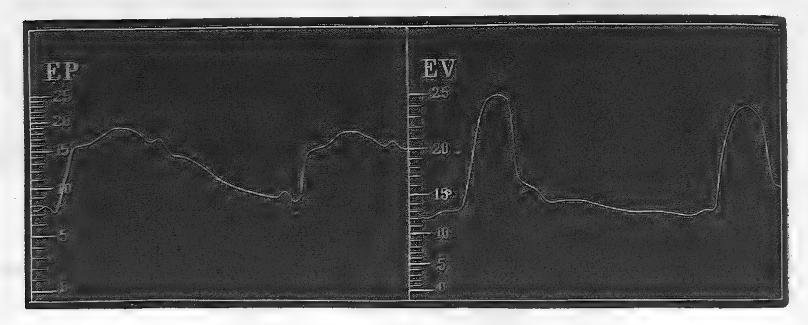


Fig. 364. — Echelles graduées d'un manomètre élastique EP et d'un hémodromographe EV (Marey).

constriction qu'à la condition d'être accompagnée d'une diminution de la vitesse ; si la vitesse s'accroît en même temps, il s'agira d'une modification d'origine cardiaque.

Le tableau suivant, emprunté à Beaunis, résume les variations corrélatives de la pression et de la vitesse.

FACTEURS.		RÉSULTATS.	
Énergie du cœur.	Résistances périphériques	Pression.	Vitesse.
Constante..........	Augmentées.	Augmente.	Diminue.
	Diminuées.	Diminue.	Augmente.
Augmentée..........	Constantes.	Augmente.	Augmente.
	Augmentées.	Augmente.	Ne varie pas.
	Diminuées.	Ne varie pas.	Augmente.
Diminuée...........	Constantes.	Diminue.	Diminue.
	Augmentées.	Ne varie pas.	Diminue.
	Diminuées.	Diminue.	Ne varie pas.

CHAPITRE V

POULS ET SPHYGMOGRAPHIE

A.

On a vu, dans les tracés simultanés de la pression et du cœur, que chaque pulsation cardiaque s'accompagne d'un renforcement de la courbe

(oscillation de premier ordre — élément variable), qui est l'indice de la projection de l'ondée ventriculaire. — Si de même on palpe simultanément chez l'homme l'artère radiale et le cœur, on constate sur l'artère un soulèvement brusque, qui correspond à un choc précordial : ce soulèvement de l'artère est le pouls.

Le *pouls* est une variation de la tension artérielle, produite par la systole ventriculaire, et la *sensation du pouls* est l'impression que produit, sur les doigts qui palpent l'artère, le durcissement de l'organe par cette variation de la pression.

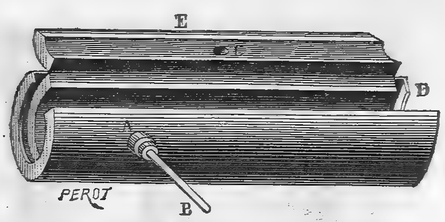


Fig. 365. — Appareil de Poiseuille pour démontrer la dilatation des artères (Marey).

Le pouls n'est pas la dilatation de l'artère, qui, comme l'a montré Poiseuille, peut subir des changements de volume à chaque pulsation (fig. 365). Ce changement de volume dépend lui-même de la variation de tension.

Le pouls n'est pas davantage le passage, sous le doigt qui palpe, de l'ondée expulsée, au moment actuel, par la systole ventriculaire, que l'on perçoit d'une façon synchrone avec la pulsation artérielle. Si l'on mesure chez un animal la vitesse de propagation des ondées et la pression, on voit, en comprimant l'artère au delà du point d'application de l'hémodromographe, que la

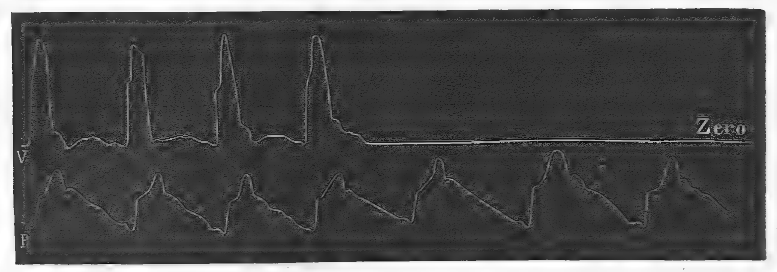


Fig. 366. — Compression d'une artère, arrêt de la vitesse et accroissement de la pression au-dessus du point oblitéré (Marey).

vitesse tombe à zéro et que, malgré la suppression de tout transport de liquide, la pulsation continue (fig. 366).

La variation de tension artérielle qui caractérise le pouls est le résultat du passage dans le vaisseau d'une onde pulsatile.

B. — MOUVEMENTS ONDULATOIRES DANS LES LIQUIDES

En effet, quand un liquide pénètre, d'une façon intermittente, dans un tube élastique, il se produit non seulement un mouvement de translation, mais encore, sous l'influence de l'élasticité, un mouvement d'ondulation qui a été étudié par E.-H. Weber.

On appelle onde positive l'onde dont le sommet dépasse le niveau du liquide, onde négative celle qui est au-dessous de ce niveau.

En appliquant sur un tube élastique, à travers lequel un piston lance des ondées périodiques, des appareils enregistreurs (T.E.), Marey a vu les faits suivants (fig. 367).

Le mouvement du liquide se traduit par une première onde qui se transporte à travers les tubes de l'entrée à la sortie (onde centrifuge, primaire, directe). Cette onde primaire est suivie d'ondes secondaires, tertiaires, etc., b, c...

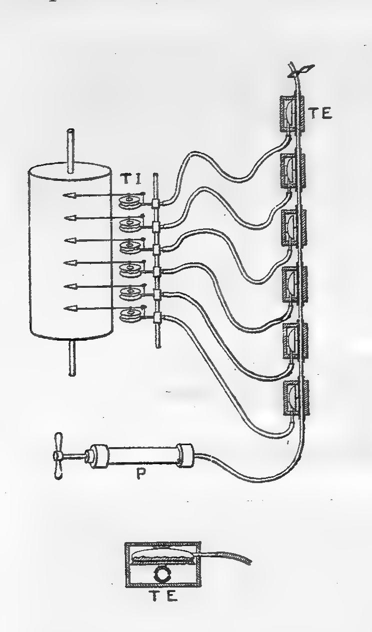


Fig. 367. — 1. Disposition complète de l'appareil pour inscrire le mouvement des ondes liquides. — 2. Explorateur du passage de l'onde suivant la longueur d'un tube élastique (d'après Marey) (*In* Morat et Doyon, *loc. cit.*).

Fig. 368. — Transport des ondes positives dans un tube élastique (d'après Marey). Cette figure représente les formes que revêt le changement de volume du tube élastique en six points différents de sa longueur sous l'influence d'une brusque introduction de liquide par l'une de ses extrémités. $1a$, $2a$, $3a$..., $6a$, onde primaire directe; b, onde secondaire; c, onde tertiaire; a', onde réfléchie (Morat et Doyon, *loc. cit.*).

Arrivée à l'extrémité du tube, cette onde centrifuge se réfléchit (onde réfléchie ou onde centripète) et retourne à l'entrée du tube (fig. 368).

La vitesse de ces ondes est proportionnelle à la force élastique du tube; elle est indépendante du mouvement de translation; elle croît avec la rapidité d'impulsion du liquide et la pression à laquelle ce liquide est soumis : il en est de même des ondes centrifuges secondaires, réfléchies sous forme d'ondes centripètes secondaires, etc.

Dans des tubes branchés, il se fait un mélange d'ondes, qui passent d'un tube dans un autre. Cependant l'aorte a ses propres ondes qu'elle envoie

dans les autres artères ; les ondes particulières de ces artères sont absorbées par l'aorte, qui les éteint comme un réservoir élastique (Marey) (1).

L'interférence d'ondes de sens différent, positives ou négatives, centrifuges ou centripètes, peut influencer le mouvement ondulatoire. Deux ondes de même sens s'ajoutent, deux ondes de sens contraire s'amoindrissent.

Le système artériel présente toutes les conditions nécessaires à la production d'ondes centrifuges, d'ondes centripètes et d'interférences. Mais en présence des nombreux cas théoriques possibles, il est difficile de déterminer celui qui s'applique réellement au cas de la circulation artérielle (2).

La vitesse de propagation des ondes dans des conduits élastiques est de 10 mètres à la seconde (Marey), 11^{m},80 (Landois), 11^{m},20 (Weber).

C. — MOYENS D'ÉTUDE

Pour étudier le pouls, on se sert de *sphygmographes*.

Un sphygmographe est essentiellement un appareil muni d'un ressort qui s'applique sur l'artère et la déprime (fig. 369). Quand l'onde pulsatile passe

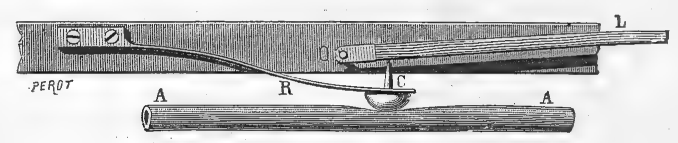


Fig. 369. — Théorie du sphygmographe à ressort. — A.A, artère ; R, ressort qui la comprime ; C, couteau qui soulève le levier L ; O, centre de mouvement du levier (Marey).

au point d'application, elle soulève le ressort, dont les mouvements sont transmis à un système de leviers, différant suivant les appareils, et qui inscrivent leur déplacement directement ou par l'air.

Les modèles de sphygmographes sont nombreux. Je n'en citerai que quelques-uns :

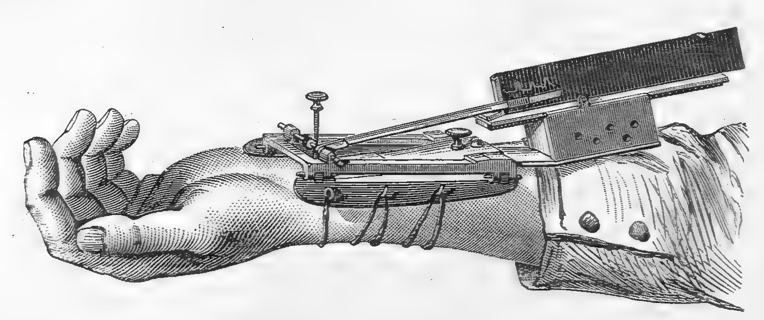


Fig. 370. — Sphygmographe direct (Marey).

Le *sphygmographe direct de Marey* (fig. 370) : inscription directe des déplacements du ressort sur une plaque enfumée qui se déplace, grâce à un

(1) Marey, *Circulation du sang*.
(2) Tigerstedt-Kreislauf, p. 377.

mouvement d'horlogerie. — Le *sphygmographe à transmission* (fig. 371) : action du ressort sur la membrane élastique d'un tambour dont les mouve-

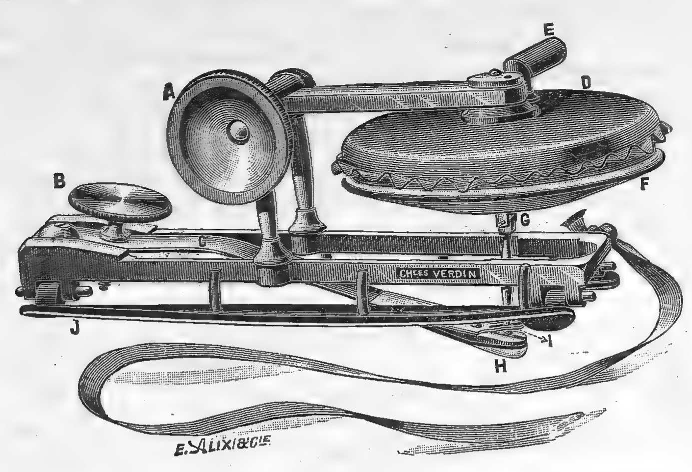


Fig. 371. — Sphygmographe à transmission envoyant la pulsation artérielle à un levier inscripteur situé à distance (Marey).

ments sont transmis par l'air à un appareil enregistreur. — Le *sphygmographe de Dudgeon* (fig. 372) : inscription directe par un système de leviers

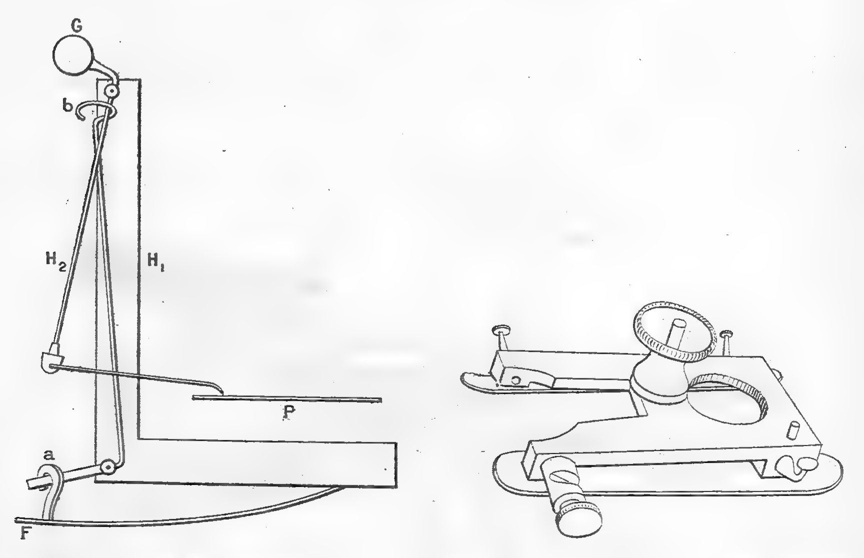


Fig. 372. — Levier de l'appareil de Dudgeon. (*In* v. Frey, *Untersuchung des Pulses*).

Fig. 373. — Cadre mobile du sphygmographe de v. Frey (v. Frey, *loc. cit.*).

très sensibles, sur une feuille de papier enfumée. La feuille de papier étant entraînée directement, sans cadre, peut avoir une longueur variable (possibi-

lité de longs tracés). — Le *sphygmographe de v. Frey* (fig. 373 et 374) : inscription directe sur un petit cylindre. Dans cet appareil, ainsi d'ailleurs que dans le *sphygmographe de Ludwig*, le cadre, qui se fixe sur l'avant-bras, est mobile et indépendant du sphygmographe; l'application de l'instrument, plus facile et plus exacte, se fait en deux temps. Dans un premier, on fixe le cadre

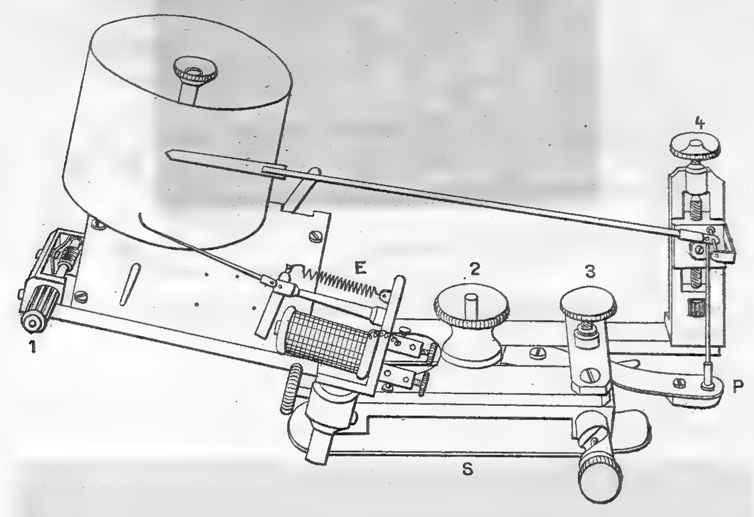


Fig. 374. — Sphygmographe de v. Frey (v. Frey, *loc. cit.*).

de telle sorte que la radiale soit bien au milieu de la partie évidée du cadre; dans un deuxième, on fixe sur le cadre le sphygmographe dont le ressort

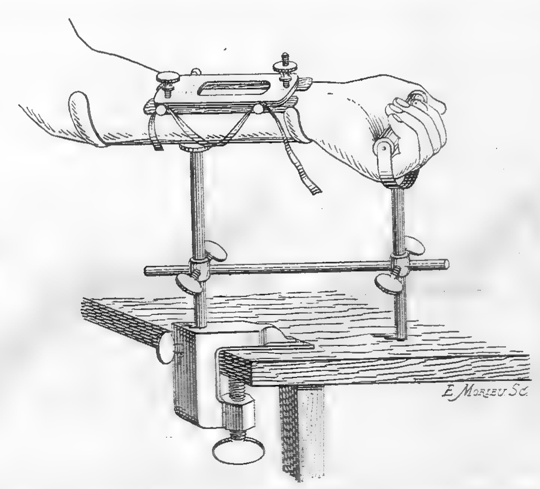


Fig. 375. — Support pour l'avant-bras (Extr. du catalogue de Petzoldt).

s'appliquera dès lors exactement sur l'artère. Il est utile également de se servir d'un support spécial pour l'avant-bras (fig. 375).

D. — CARACTÈRES GRAPHIQUES DU POULS. — SPHYGMOGRAMMES

Le tracé du pouls présente une ligne d'ascension, un sommet, une ligne de descente (fig. 376).

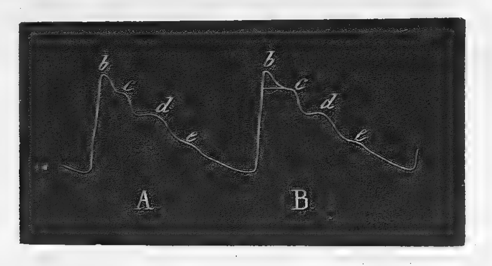


Fig. 376. — Type normal du pouls radial grandi. — Les ondulations *b* et *c* appartiennent à la phase systolique (Marey).

La ligne d'ascension, qui correspond à l'arrivée de l'onde pulsatile, est plus ou moins droite suivant la force impulsive de cette onde.

Le sommet, moment du passage de l'onde sous le ressort qui déprime l'artère, sera plus ou moins aigu, plus ou moins arrondi, prendra quelquefois même la forme de plateau ascendant ou descendant (fig. 377).

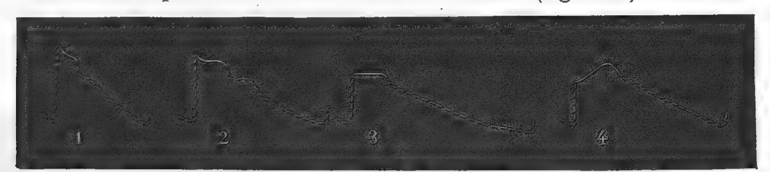


Fig. 377. — Types divers du pouls ; le sommet de la pulsation du tracé est représenté par une ligne pleine (Marey).

La ligne de descente qui répond à l'éloignement de l'onde présente des inflexions dont la plus importante correspond au dicrotisme.

Un tel tracé représente assez fidèlement la manière dont l'onde pulsatile



Fig. 378. — Tracé hémautographique obtenu en recevant sur une bande de papier le jet de sang provenant de la carotide d'un chien (Landois). *In* Frédéricq et Nuel, *Éléments de Physiologie humaine.*

progresse, et les accidents de la courbe ne sauraient plus être attribués aux appareils enregistreurs depuis la publication, par Landois, de son tracé

hémautographique (obtenu sans appareil par projection directe du sang) (fig. 378).

E. — RETARD DU POULS SUR LA PULSATION CARDIAQUE. — VITESSE DE PROPAGATION DE L'ONDE PULSATILE

Si l'on prend simultanément le tracé du cœur et celui d'une artère, on voit un certain retard entre le début des deux phénomènes (fig. 379).

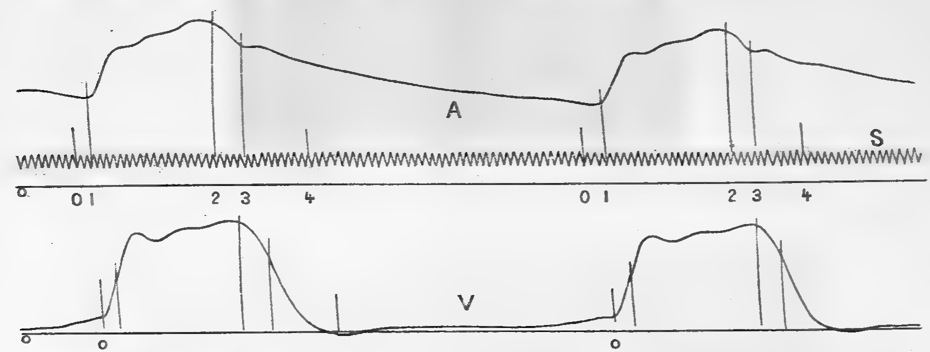


Fig. 379. — Courbes de pression dans l'aorte (A) et dans le ventricule gauche (V) chez le chien (d'après Hurthle, *in* Tigerstedt-Kreislauf).

Ce retard s'accentue si l'on prend le tracé d'artères de plus en plus éloignées du cœur (fig. 380).

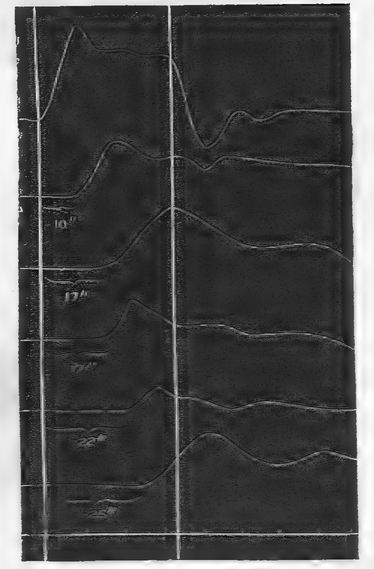


Fig. 380. — Progression de l'onde pulsatile. (*In* A. Waller, *loc. cit.*).

Le retard du pouls sur le début de la systole ventriculaire comprend : 1° le temps nécessaire au cœur pour surmonter la pression aortique; 2° la vitesse de propagation des ondes dans les vaisseaux.

L'évacuation du contenu ventriculaire ne se produit pas immédiatement après le début de la contraction; il a lieu quand la pression intraventriculaire dépasse légèrement la pression intra-aortique. Il y a un *retard essentiel* (Chauveau, Marey), une *période de compression*, et l'ouverture des valvules sigmoïdes ne se fait que vers le milieu de la ligne d'ascension du tracé ventriculaire (fig. 381); c'est à partir de ce point qu'il convient de mesurer le retard du pouls sur la systole.

La valeur du temps de compression ventriculaire a été évaluée par Chauveau et Marey à 0,1 de seconde.

D'autres auteurs, Landois, Edgren, l'ont trouvée inférieure; Hurthle a trouvé chez le chien 0,02-0,04 de seconde.

La vitesse de propagation de l'onde pulsatile est en moyenne de 8 à 9 mètres à la seconde; la vitesse de la propagation du sang dans les artères n'étant que de 25 à 30 centimètres, on voit l'énorme différence qui existe entre les deux vitesses.

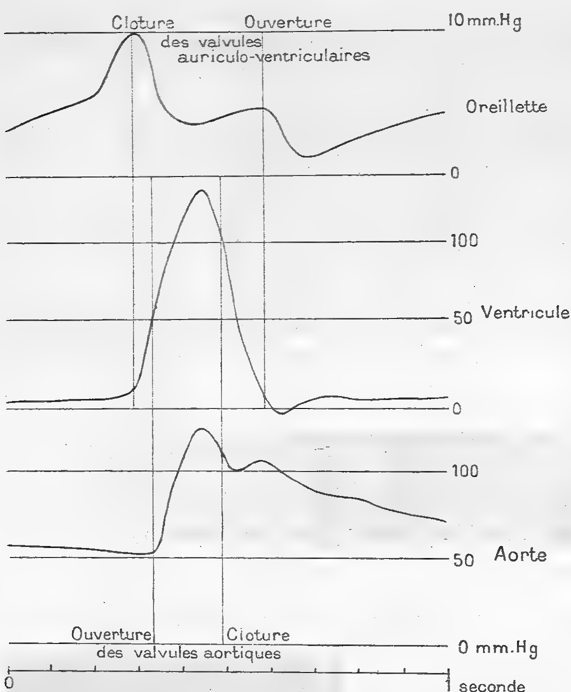


Fig. 381. — Pulsations de l'oreillette du ventricule et de l'aorte, avec indication de l'ouverture (Œffnung) et de la fermeture (Schluss) des valvules auriculo-ventriculaires (V. Worhofklappen) et aortiques. La graduation horizontale indique des millimètres de mercure (d'après v. Frey).

Le pouls est donc un phénomène en rapport avec la systole ventriculaire ; au moment où il se produit, la pression s'élève dans l'artère (élément variable de la pression), la vitesse s'accélère (élément variable de la vitesse), une onde pulsatile chemine à travers l'artère, et le doigt, qui comprime le vaisseau sur un plan osseux, perçoit une sensation de battement.

F. — RAPPORTS DU POULS AVEC LA CIRCULATION ARTÉRIELLE

1° Sphygmogramme et cardiogramme. — On distingue dans le tracé du pouls une période qui correspond à la systole ventriculaire (phase systolique du pouls), et une période qui répond à la diastole du cœur (phase diastolique du pouls). En d'autres termes, on a cherché à déterminer sur le sphygmogramme quels étaient les indices graphiques qui correspondaient à ces deux périodes dans le cœur (fig. 382).

L'indice graphique, sur le sphygmogramme, de la fin de la systole ventri-

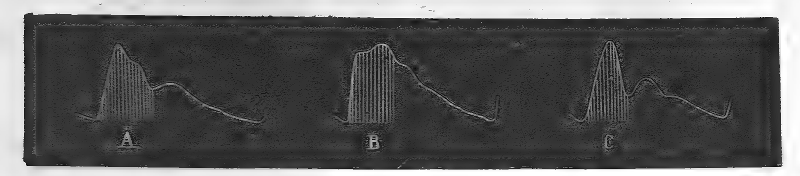


Fig. 382. — Trois courbes du pouls de formes différentes A B C. Dans chacune d'elles, la phase systolique est teintée de hachures (Marey).

culaire est approximativement l'ondulation dicrote. En effet, le dicrotisme est produit par une onde centrifuge qui, partant des valvules sigmoïdes, chemine à travers les vaisseaux. Cette onde est centrifuge ; en effet, si le

dicrotisme était une onde de retour (onde primitive, réfléchie de la périphérie vers le centre, après avoir parcouru un trajet direct), le dicrotisme devrait disparaître par la compression de l'artère immédiatement au delà du sphygmographe. Or ce fait ne se produit pas (Marey). De plus, dans deux artères inégalement éloignées du cœur, le dicrotisme se montre d'abord dans l'artère la plus rapprochée (Tigerstedt).

Cette onde centrifuge est probablement produite par le mécanisme suivant : à la fin de l'impulsion cardiaque, il existe, dans l'aorte, une pression beaucoup plus élevée que dans le ventricule ; cet excès de pression tend à fermer les sigmoïdes qui, à leur tour, retiennent le sang de l'aorte en dehors du ventricule. Ce « choc de l'onde aortique rétrograde » (Marey) contre les valvules fermées provoque une onde secondaire, origine du dicrotisme (Buisson, Marey).

Les valvules sont donc déjà fermées au moment de la production du dicrotisme. La clôture de ces valvules s'indique quelquefois, surtout dans la carotide, par une petite ondulation (S) qui précède le dicrotisme (fig. 383).



Fig. 383. — Ondulation prédicrote du pouls.

On la voit nettement indiquée (fig. 363) dans le repère 3, sur le tracé de la pression ; à ce moment, le tracé de la vitesse indique un trajet rétrograde du sang dans les valvules. Avec le repère 4 commence le dicrotisme.

Cette ondulation S peut s'observer également sur le cardiogramme, distincte de l'ondulation dicrote (fig. 384).

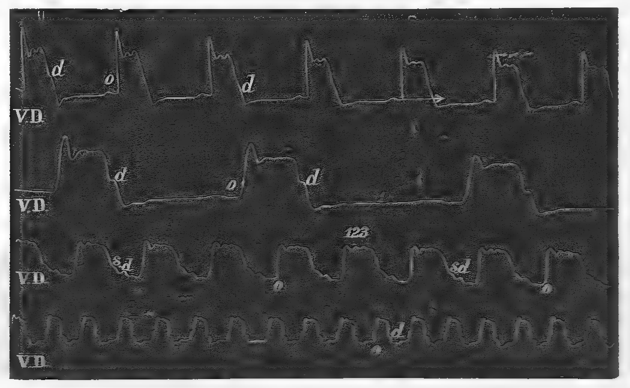


Fig. 384 . — Types de cardiogrammes.

Quoi qu'il en soit, les valvules sigmoïdes étant fermées à ce moment, la période d'expulsion du ventricule a cessé, la systole est terminée.

Ces indices graphiques (S et D), qui, sur le sphygmogramme, correspondent à cette période, indiquent la fin de la phase systolique.

Le sphygmogramme indique donc avec assez d'exactitude les phases de l'activité du cœur.

2° Fréquence. — La fréquence du pouls est directement en rapport avec le rythme du cœur (Voy. *Cœur*).

3° Amplitude. — α. *Cœur.* — L'amplitude du pouls peut dépendre de la force impulsive du cœur, mais n'en dépend pas nécessairement, car elle est surtout influencée par les variations de la pression artérielle.

Or, comme l'état de la pression seul ne peut pas nous renseigner sur l'activité du cœur, le pouls, élément graphique de cette pression, peut encore beaucoup moins nous fournir cette donnée. Cependant, sauf variations du côté de la circulation périphérique, l'amplitude du pouls est influencée par la force des systoles.

β. *Pression.* — Quand la pression est basse, l'amplitude du pouls est habituellement augmentée à cause de la facilité avec laquelle se produisent les variations de la tension. Cette circonstance favorise aussi l'amplitude du dicrotisme.

Amplitude du pouls, élévation de l'ondulation dicrote, sont des signes classiques de la basse pression. Mais nous savons aussi que les circulations locales peuvent être indépendantes de la circulation générale; qu'une modification vaso-motrice se produise dans la main, et le sphygmographe indiquera un état de la circulation qui sera exact pour l'organe exploré, mais qu'on ne pourra appliquer à l'ensemble du réseau vasculaire.

Le resserrement des vaisseaux périphériques diminuerait l'amplitude.

Les conditions qui déterminent la forme du pouls sont donc complexes; il importe de se montrer réservé dans les conclusions, surtout en clinique; et Tigerstedt (1) dit, avec raison, que l'étude du pouls limitée à l'artère radiale ne peut, à ce point de vue, donner que des renseignements très limités. Comme le dit v. Frey (2) : « Le sphygmogramme est une courbe de pression construite avec des ordonnées dont l'unité est inconnue ».

CHAPITRE VI

MOUVEMENT DU SANG DANS LES VEINES

A.

La circulation veineuse a pour but le retour au cœur du sang répandu dans la nappe capillaire.

Nous aurons à étudier successivement les propriétés des veines, les conditions mécaniques du cours du sang veineux, et à donner quelques exemples des variations physiologiques de la circulation veineuse.

I. ***Propriétés des veines.*** — Les veines sont très extensibles; elles peuvent ainsi loger une grande quantité de sang, s'adapter aux modifications brusques de la circulation, et servir, pour ainsi dire, de réservoir à la circu-

(1) Tigerstedt-Kreislauf.
(2) Frey, *Die Untersuchung des Pulses*, 1892, p. 36.

lation générale. Ce rôle est surtout important au niveau du cœur, qui puise dans le sang accumulé dans le réservoir des grosses veines. Elles sont moins élastiques que les artères.

Les veines sont contractiles (contraction des veines du dos de la main par un choc brusque), mais à un degré bien moindre que les artères.

Les veines présentent, à certains endroits, notamment au niveau des grosses veines qui avoisinent le cœur, des mouvements rythmiques de contraction, dont l'efficacité, au point de vue mécanique, n'est pas très grande, mais dont la signification physiologique a quelque valeur dans l'explication des mouvements du cœur (Engelmann). Les veines présentent des valvules.

II. ***Conditions mécaniques du sang dans les veines.*** — Le cours du sang dans les veines est centripète, alors qu'il était centrifuge dans les artères.

Les facteurs de la circulation veineuse sont aujourd'hui bien connus.

a. **Action du cœur.** — Le sang, dans les veines, chemine d'une façon uniforme. L'action du cœur étant intermittente, son influence se fait-elle sentir sur la circulation veineuse? La question avait été discutée.

Deux expériences décisives montrent que la progression du sang veineux est directement sous la dépendance du cœur.

1° On met à nu l'artère et la veine d'un membre. La circulation dans la veine est lente et uniforme. On ligature alors la veine : celle-ci gonfle peu à peu, et, à mesure que le sang s'y accumule, que la pression monte, on voit dans les veines des pulsations synchrones avec les pulsations artérielles (Magendie). La force du cœur s'est transmise à travers les capillaires gorgés de sang. Le même résultat se produit dans le cas de vaso-dilatation.

2° Si l'on applique sur chaque vaisseau un manomètre (A et V) au moyen d'une canule en T, on voit qu'après la ligature de la veine la pression, dans le manomètre V, est au même niveau que dans le manomètre A (Poiseuille).

La force impulsive du cœur influe donc sur la circulation veineuse; si dans les conditions normales le courant n'y est point saccadé, c'est que les renforcements dus à l'action systolique sont éteints dans les capillaires.

Mais le cœur n'agit pas seulement par *vis a tergo,* son activité influe aussi par *vis a fronte.*

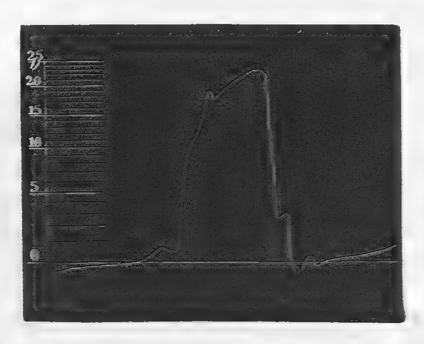


Fig. 385. — Un tracé des changements de la pression dans le ventricule gauche avec son échelle de graduation (Marey).

Le cœur, en se contractant, lance en dehors une certaine quantité de sang (évaluée jadis à 180 grammes, et maintenant à beaucoup moins); il en résulte une certaine aspiration qui s'ajoute à l'aspiration thoracique dont il sera question plus bas. D'autre part, pendant le relâchement ventriculaire, la pression négative intrathoracique contribue à produire, dans l'intérieur de la cavité ventriculaire, le vide post-systolique (Chauveau et Marey; Voy. *Cœur*), d'où

appel de sang veineux dans l'oreillette (fig. 385). Pendant la contraction du cœur, Chauveau et Faivre ont montré que les valvules auriculo-ventriculaires s'abaissent vers le ventricule, d'où augmentation de la cavité auriculaire et appel plus accentué de sang veineux dans cette cavité. Enfin, à la fin de la systole de l'oreillette, existe dans cette cavité une pression négative qui influe sur l'arrivée du sang par les gros troncs veineux.

Le cœur contribue donc à la progression du sang dans les veines, à la fois par l'impulsion et par l'aspiration qu'il exerce, aspiration qui résulte des pressions négatives que produisent dans ses cavités sa propre activité et l'influence d'un organe voisin, le poumon.

b. **Aspiration thoracique.** — Le poumon, dilaté dans une cavité close, tend constamment à revenir sur lui-même par le retrait de sa force élastique, et crée, par conséquent, autour de lui, une aspiration (pression négative — tendance au vide). Cette pression négative varie, en atteignant un maximum à l'inspiration, un minimum à l'expiration, mais elle existe toujours, même pendant le repos respiratoire.

Dans les veines, il existe une certaine pression, très faible, mais positive. Il y a donc écoulement permanent du sang des veines vers l'intérieur de la cavité thoracique.

Une expérience classique (Barry) montre bien ce fait. Un tube de verre est fixé par la jugulaire dans la veine cave supérieure. L'extrémité libre du tube plonge dans un vase plein d'eau. Le niveau de l'eau s'élève dans le tube et oscille avec les mouvements respiratoires (élévation à l'inspiration, chute à l'expiration). Dans un violent effort d'expiration (glotte fermée), la pression peut devenir positive dans la cavité thoracique, les veines jugulaires se gonflent. Bouchard a constaté par l'examen radioscopique que l'oreillette se gonflait pour ainsi dire au moment de l'exagération inspiratoire de la pression négative.

Cette aspiration, qui provoque une accélération du cours du sang veineux, se fait sentir jusque dans des veines fort éloignées du cœur, la saphène interne (Wertheimer).

Dans la veine porte (fig. 386 et 387), comprise entre deux réseaux capillaires

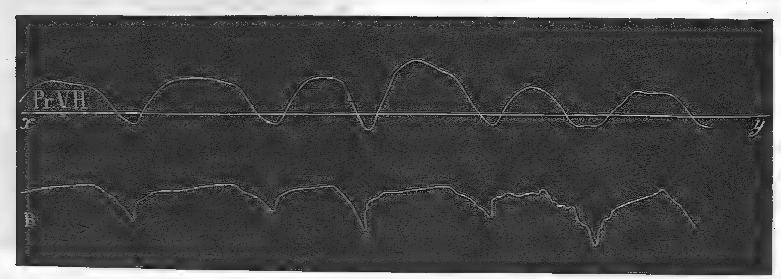


Fig. 386. — Pression dans une veine sus-hépatique, PrV.H. — Tracé de la respiration recueilli avec le pneumographe, R. Le sens des variations est le même dans les deux tracés (Marey, *loc. cit.*, d'après Rosapelly).

(intestinal et hépatique), la pression monte à l'inspiration sous l'influence de la compression du diaphragme. Dans la veine cave inférieure, au contraire,

qui est maintenue béante, se fait sentir la double influence concordante de la diminution de pression intrathoracique et de l'augmentation de pression intra-abdominale par compression du diaphragme.



Fig. 387. — Pression dans la veine porte, P*r*. V. P. — Respiration inscrite au monographe, R. Les deux courbes varient en sens inverse l'une de l'autre (Marey, *loc. cit.*, d'après Rosapelly).

c. **Valvules**. — Les valvules servent à contre-balancer l'effet de la pesanteur contre laquelle le courant veineux a à lutter. Elles permettent également aux contractions musculaires d'aider à la progression du sang : un segment de veine, comprimé par un muscle en activité, ne peut, grâce aux valvules, laisser échapper le sang que du côté du cœur. Il en est de même de l'influence des battements des artères voisines (circulation par influence d'Ozanam).

B. — PRESSION VEINEUSE. — POULS VEINEUX

I. ***Pression veineuse***. — 1° Technique. — Il importe de ne pas interrompre le cours du sang; aussi est-il nécessaire d'introduire dans le vaisseau une canule en T ; on peut encore se servir de canules spéciales, comme celle de Wertheimer (fig. 388) : la paroi du vaisseau est pincée entre deux palettes, l'une à l'intérieur, l'autre à l'extérieur, au moyen d'un écrou. Ces palettes sont traversées par un tube qui met en communication le vaisseau et le manomètre. On peut aussi introduire, dans une collatérale, une canule droite ; mais il faut que la collatérale soit à peu près perpendiculaire à la direction du vaisseau principal. Il y a avantage à irriguer d'une façon continue le point de jonction de la canule et du vaisseau par une solution de carbonate de soude, arrivant goutte à goutte, pour retarder la coagulation. — Les manomètres sont chargés de la même solution, sans interposition de mercure. Inscription par l'air.

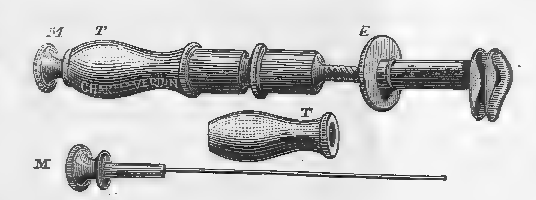


Fig. 388. — Canule de E. Wertheimer pour la pression veineuse.

2° Pression. — α. La *pression veineuse* est très basse; au voisinage du thorax elle est souvent négative, c'est-à-dire inférieure à la pression atmosphérique (entrée de l'air dans les veines). Sa valeur n'est que de quelques millimètres de mercure (3 à 10 millimètres) et diminue de la périphérie vers le centre. L'élément variable y fait défaut, excepté près du cœur, où l'on observe une légère diminution de la pression à chaque diastole auriculaire,

et une petite augmentation à la systole. La vitesse, dans les grands

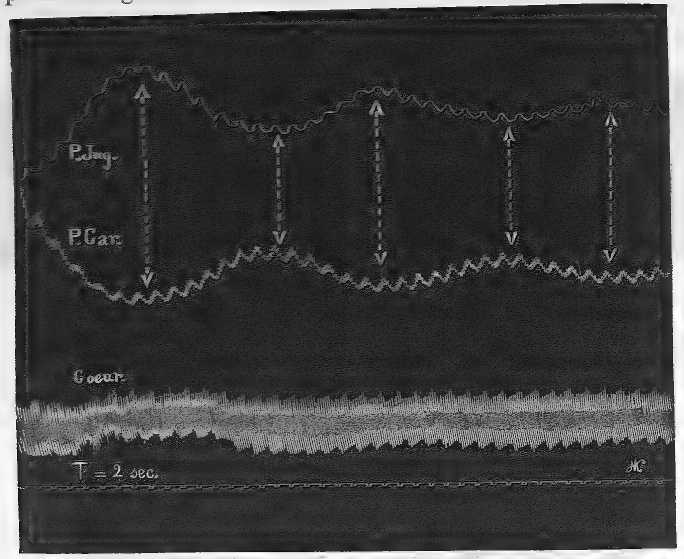


Fig. 389. — Variations corrélatives de la pression artérielle (P. *Car.*), et de la pression veineuse (P. *Jug.*).

troncs, augmente ; elle est quelquefois égale à la vitesse dans les

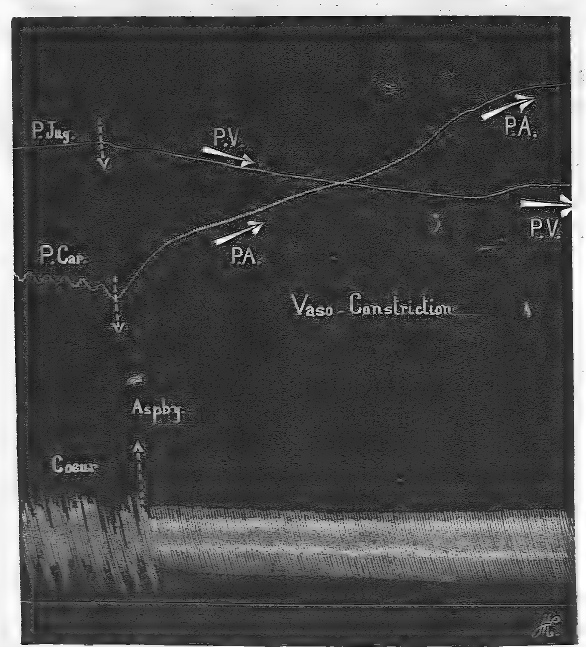


Fig. 390. — Pression artérielle (P. *Car.*) et pression veineuse (P. *Jug.*) dans le cas de vaso-constriction par excitation asphyxique.

artères. Elle est plus faible à la périphérie. Elle est d'ailleurs très variable.

β. *Variations de la pression veineuse.* — La pression veineuse subit des variations du fait de l'aspiration thoracique et de l'aspiration cardiaque, dont nous avons déjà parlé. De plus, le rythme du cœur et la contractilité vasculaire peuvent y amener des modifications notables.

Le cœur, en se ralentissant, provoque une augmentation de la pression : dans l'arrêt expérimental du cœur par excitation du nerf pneumogastrique,

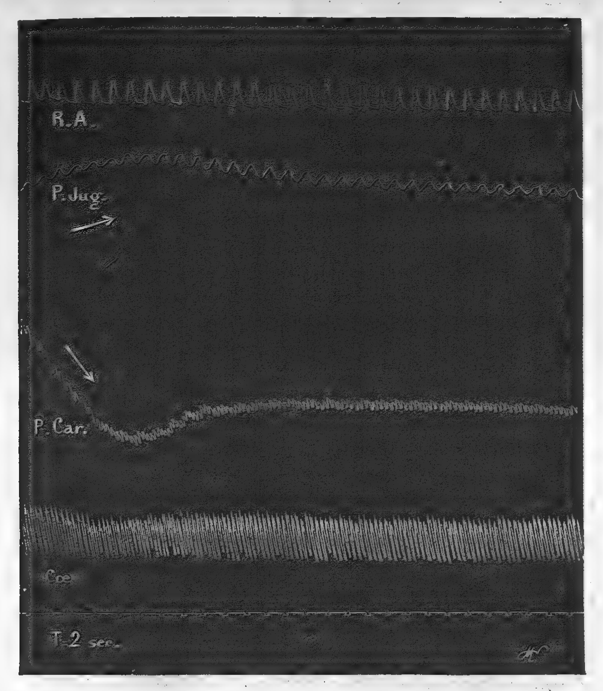


Fig. 391. — Pression artérielle et pression veineuse (P. *Jug.*). — R. A., respiration artificielle. — Cœ, tracé cardiographique.

on voit monter la pression veineuse. Ce qui se passe dans ce cas extrême se réalise également dans les variations physiologiques du rythme ou de la force des systoles lorsque ces changements ne sont pas compensés par des modifications, de sens contraire, dans l'état des vaisseaux périphériques.

L'influence des variations de la circulation périphérique sur la pression veineuse, indépendamment de toute modification cardiaque, est très grande.

Les trois figures 389, 390 et 391 montrent ces relations, mieux qu'une description.

Dans le tracé figure 389, nous voyons des ondulations rythmiques de la pression veineuse, synchrones avec les ondulations artérielles et de même nature : petites oscillations respiratoires d'origine mécanique (respiration artificielle), grandes oscillations d'origine vaso-motrice ; mais, tandis que la pression artérielle descend, la pression veineuse monte, le rythme du cœur restant constant.

Le tracé (figure 390) nous montre un exemple des variations corrélatives, de sens inverse, des deux pressions, artérielle et veineuse, dans l'excitation asphyxique, sans modifications sensibles, à ce moment, du rythme du cœur : des variations de ce genre permettent d'affirmer la nature vaso-motrice (vaso-constriction dans le cas actuel) d'une modification de pression, et peuvent servir de moyen d'étude de l'innervation vasculaire.

γ. *Pouls veineux.* — L'activité du cœur retentit sur la circulation et pro-

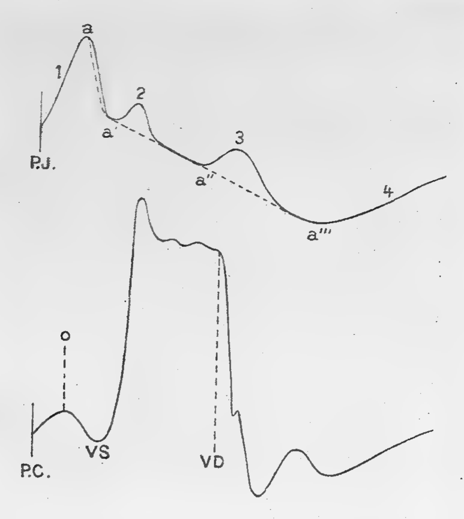


Fig. 392. — Pouls veineux (François Franck) (*In* Beaunis, *Physiologie*).

duit, au niveau de la jugulaire surtout, un pouls veineux physiologique. Il est dû : 1° à la stase, sans reflux, du sang au moment de la systole auriculaire *a* (fig. 392) ; 2° à l'aspiration exercée par la systole ventriculaire *a''* : dépression (Fr. Franck).

PLÉTHYSMOGRAPHIE

Par M. le Dr HALLION

Il est souvent d'un grand intérêt, pour le physiologiste, d'étudier les variations de volume d'un organe. Mais la plupart du temps, ces variations ne sont pas accessibles à l'observation simple ; il faut les mettre en évidence à l'aide d'instruments appropriés. Ces instruments ont reçu le nom d'*appareils volumétriques* ou *pléthysmographes*. Ce dernier terme implique, de par son étymologie, l'application de la méthode graphique ; toutefois, on peut se contenter de rendre les phénomènes appréciables à l'œil, sans chercher à les inscrire.

A prendre le terme de *pléthysmographie* dans son acception la plus compréhensive, ce chapitre devrait embrasser l'étude d'un grand nombre d'appareils employés par le physiologiste. Le sphygmographe, le pneumographe, par exemple, sont des variétés de pléthysmographes. Mais l'usage a restreint la signification de ce dernier terme ; on ne l'emploie guère que pour désigner les appareils spécialement affectés à l'étude des variations du volume total d'un organe en rapport avec l'abondance du sang que celui-ci contient.

Mettant à part les organes à contenu gazeux, on peut rattacher aux conditions suivantes les variations du volume total d'un organe donné : variations de volume des cellules constituantes ; variations d'abondance des sucs interstitiels, et, quand on considère une glande, des liquides sécrétés ; enfin et surtout, variations dans la quantité de sang que contiennent les vaisseaux. Ces dernières variations sont les plus importantes, ou du moins les plus rapides, dans la plupart des cas. Aussi la pléthysmographie a-t-elle été appliquée principalement à l'étude de la circulation du sang.

Toutes choses égales d'ailleurs, le volume total d'un organe augmentera fatalement sous une des trois influences suivantes : augmentation de la pression artérielle entraînant une vitesse plus grande dans l'apport du sang, augmentation de la pression veineuse entraînant une vitesse moindre dans l'évacuation du sang, vaso-dilatation d'origine nerveuse ou paralysie vasculaire élargissant les réseaux sanguins. Les influences inverses engendrent des effets inverses. Ajoutons que ces différentes influences se combinent le plus souvent, soit pour se renforcer mutuellement, soit pour s'atténuer mutuellement. C'est au physiologiste à faire la part de chacune d'elles, par des procédés de contrôle variés que nous ne pouvons indiquer ici. Dans l'étude des circulations locales, aucun procédé n'exclut l'emploi des autres, mais le pro-

cédé pléthysmographique est un des plus fidèles, des plus précis, des plus commodes, chaque fois qu'il est applicable.

La figure 393, que j'emprunte à un article que j'ai publié en collaboration avec M. François Franck, nous offre un exemple des indications complexes que ce procédé fournit. Cette figure est destinée à montrer les ondulations vaso-motrices d'organes dans lesquels on ne peut invoquer

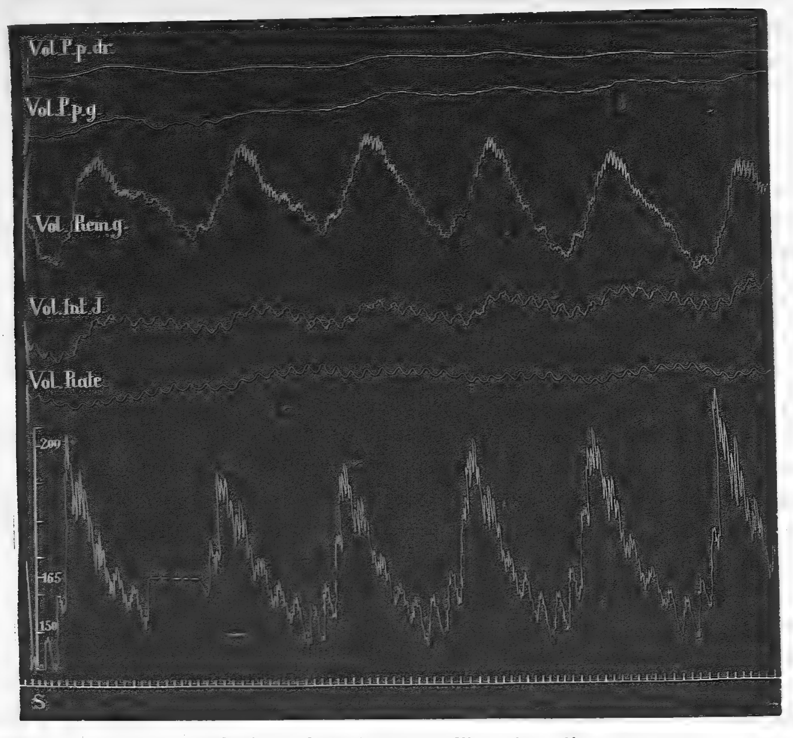


Fig. 393. — Ondulations rythmiques des vaisseaux de l'intestin et d'autres organes. — Les extrémités digitales postérieures droite (*Vol. P. p. dr.*) et gauche (*Vol. P. p. g.*), le rein gauche, l'intestin grêle (*Vol. Int. J.*) et la rate présentent, dans ce spécimen, des ondulations vasomotrices parallèles entre elles et inverses des ondulations de la pression artérielle fémorale.

l'intervention de contractions périodiques des muscles (extrémités digitales, rein); elle établit les rapports de ces ondulations rythmiques avec celles de l'intestin; l'origine circulatoire, vaso-motrice et non musculaire de ces dernières résulte de leur parallélisme avec celles du rein et de la patte, d'une part; de leur opposition avec celles de la pression artérielle, d'autre part. En associant à ces courbes, comme nous l'avons fait ici, celles des changements de volume de la rate, nous obtenons l'indication simultanée des variations circulatoires de ces divers réseaux, et nous pouvons analyser, sans aucune difficulté et avec une parfaite sécurité, les effets produits comparativement sur chacun d'eux par les excitations nerveuses directes, réflexes et centrales les plus variées.

Poiseuille, entourant les artères d'un manchon pour mettre en évidence

leurs alternatives de resserrement et d'expansion, avait imaginé un véritable appareil volumétrique, et c'est un dispositif analogue que Piégu (1846), puis Chelius, appliquèrent à l'étude des variations de volume des membres : dans une boîte à parois rigides était enfermé un segment de membre; la cavité de cette boîte était en rapport avec un tube de verre ouvert à l'air libre; on emplissait d'eau le récipient et une partie du tube, et suivant que le segment de membre immergé augmentait ou diminuait de volume, le niveau de l'eau s'élevait ou s'abaissait dans le tube indicateur.

Plus tard, on fit mieux que mettre en évidence le phénomène : on imagina de l'inscrire, et on put, dès lors, en pousser plus loin l'analyse. Il est juste de citer ici en première ligne Ch. Buisson, dont l'appareil rudimentaire devait donner naissance, après d'importants perfectionnements, au tambour de Marey; mentionnons encore Fick, François Franck, Mosso. Ces auteurs expérimentèrent sur les organes périphériques chez l'homme. Ch. Roy inventa un ingénieux appareil qu'il appela *oncographe*, et qui permit d'étudier les variations de volume du rein et de la rate.

Nous ne pouvons étendre davantage cet historique ; les débuts de la méthode ont été fort bien résumés dans la thèse de Suc (1), et nous y renvoyons le lecteur.

Dans cet article, où nous n'envisageons que la partie purement technique de la question, et qui sera forcément assez aride, nous indiquerons d'abord les appareils mis en usage pour explorer les variations de volume des extrémités, et plus spécialement des extrémités supérieures, chez l'homme.

Les appareils employés dans les expériences sur les divers organes des animaux appartiennent aux mêmes types, ce qui nous permettra de les indiquer seulement d'une façon très sommaire. La place nous ferait défaut, du reste, pour entrer dans les détails.

Mais avant d'aborder l'énumération des procédés et appareils qui relèvent de la méthode pléthysmographique, il convient de faire une remarque générale. Il ne faudrait pas prendre au pied de la lettre le sens du mot : appareils volumétriques ; aucun de ces appareils peut-être ne donne la *mesure* exacte des variations de volume qui se produiraient, à l'état physiologique, dans l'organe exploré. Tous, en effet, opposent plus ou moins de résistance; tous exercent, soit sur la totalité de l'organe, soit sur les vaisseaux qui s'y rendent, une compression plus ou moins forte, qui trouble quelque peu la circulation. Mais pourvu qu'on évite de gêner notablement cette dernière, on obtient des indications qui répondent à peu de chose près aux variations normales, et qui, en tous cas, sont du même sens qu'elles et leur sont sensiblement proportionnelles; c'est là l'important.

Du reste, la plupart des appareils employés en physiologie déforment les phénomènes ; cela même est un avantage, quand la déformation consiste en une simple exagération des détails, exagération qui a pour effet de les mettre en évidence. Ainsi le sphygmographe (qui n'est d'ailleurs, à tout prendre,

(1) Ch. D. Suc. Recherches historiques et critiques sur les changements de volume des organes périphériques (dans leurs rapports avec la circulation du sang) (Th. de Paris. Chez F. Savy, 1878). Ce travail a été inspiré par M. François Franck.

qu'une variété de pléthysmographe) accentue, grâce à la compression qu'il exerce sur l'artère, les variations de volume qui correspondent à la poussée intérieure du sang.

Pareillement, dans les appareils pléthysmographiques, un certain degré de compression, loin d'égarer l'observation, la seconde dans certains cas : le pouls capillaire, par exemple, est accentué et peut être plus facilement étudié dans un organe un peu serré par l'appareil qui l'entoure.

Il existe, d'une façon générale, un degré de compression qui est optimum, et qui varie avec les conditions expérimentales. Prenons un exemple, d'ailleurs tout à fait schématique. Supposons que nous explorions les variations vaso-motrices d'un organe quelconque, et que, la pression artérielle étant de 15 centimètres de mercure, nous obtenions de fort bonnes courbes avec un appareil exerçant sur l'organe une compression de 5 centimètres. Supposons maintenant que la pression artérielle devienne inférieure ou, au plus, égale à 5 centimètres ; notre appareil ne nous fournira plus aucune indication. Réduisons à 2 centimètres la compression qu'il exerce, et de nouveau les oscillations de volume d'origine circulatoire se pourront manifester. C'est affaire au physiologiste d'adopter, dans chaque cas particulier, les mesures qui conviennent le mieux.

1. — PLÉTHYSMOGRAPHIE APPLIQUÉE AUX MEMBRES DE L'HOMME

Nous diviserons les appareils employés en quatre catégories :

1° Appareils à récipient contenant de l'eau ;

2° Appareils à récipient contenant de l'air ;

3° Appareils à inscription directe : pas de récipient ;

4° Appareils à paroi élastique.



Fig. 394. — Appareil de François Franck.

1° APPAREILS AVEC RÉCIPIENT CONTENANT DE L'EAU

Le type en est fourni par l'appareil de François Franck et par l'appareil de Mosso.

Appareil de Fr. Franck. — C'est un bocal dont l'orifice est fermé par une membrane de caoutchouc pourvue de deux orifices. Le plus considérable de ces orifices livre passage à l'avant-bras, sur le pourtour duquel il s'adapte exactement ; le plus petit est muni d'un tube de verre renflé et ampoulé. Les oscillations de la membrane de caoutchouc, à travers

laquelle est engagé l'avant-bras, ont été supprimées; pour cela, on déprime le plaque de caoutchouc avec un disque épais de gutta-percha fixé lui-même par une forte traverse en cuivre qu'assujettit au bocal un collier métallique à charnière. La main, une fois engagée, empoigne une traverse intérieure qui lui donne de la fixité par rapport à l'appareil. Il est bon de suspendre ce dernier par un fort lien élastique. Le récipient étant rempli d'eau jusqu'au niveau de l'ampoule, il ne reste plus qu'à relier celle-ci à un tambour de Marey (fig. 394).

Pléthysmographe de Mosso. — C'est un cylindre en verre AB, porté sur une tablette E, librement suspendue, long de 48 centimètres sur 8 à 10 de diamètre, ouvert d'un côté et terminé de l'autre par un mince goulot. Il est

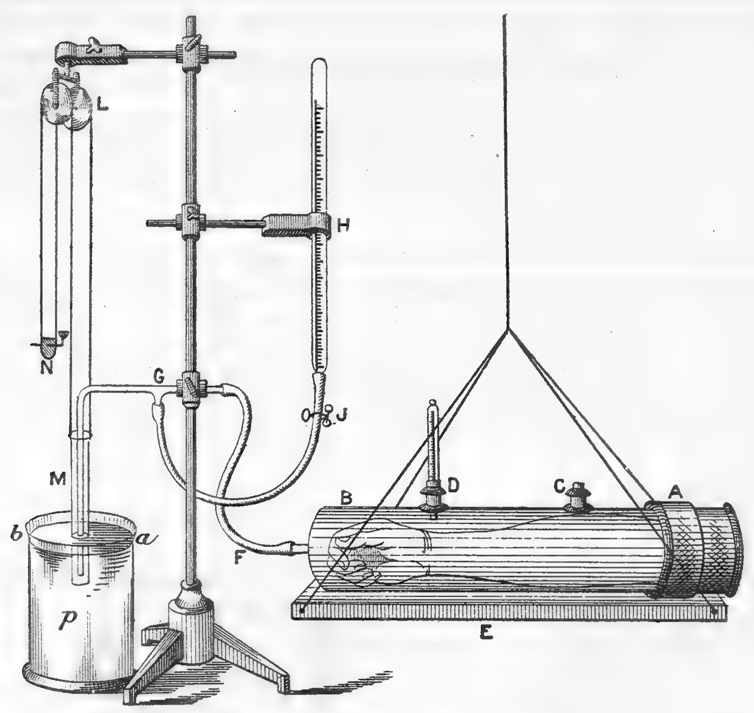


Fig. 395. — Pléthysmographe de Mosso.

pourvu de deux ouvertures C, D, qui servent à le remplir d'eau et sont fermées par deux bouchons dont l'un donne passage à un thermomètre (fig. 395).

On introduit la main, l'avant-bras et le coude. Un anneau en caoutchouc ferme la cavité du cylindre en comprimant légèrement le bras; cet anneau est assez épais pour ne pas céder aux petites augmentations de pression.

Un instrument inscrit les variations de volume de l'avant-bras, sans que la pression du liquide dans lequel il se trouve plongé soit changée. Une des extrémités du cylindre donne passage à un tube de caoutchouc F, qui s'abouche à un tuyau en verre G, lequel, en se recourbant à angle droit,

descend verticalement jusqu'au niveau *ab* du liquide contenu dans le grand verre P. Une éprouvette M, longue de 18 centimètres, à parois minces, est suspendue par deux fils de soie à une double poulie L, et tenue en équilibre par un contrepoids N, qui porte un style capable d'écrire sur du papier enfumé. L'éprouvette M est suspendue de telle façon que le tuyau vertical en verre, dont on vient de parler ci-dessus, se trouve parfaitement dans son axe, et peut se mouvoir en haut et en bas sans toucher le tuyau en verre. Chaque variation de volume du membre déplacera une certaine quantité d'eau.

Mosso a utilisé le même récipient pour obtenir, à l'aide d'un dispositif spécial, les variations du pouls total, en évitant que, dans les tracés, se manifestassent les autres variations de volume plus grandes ou plus lentes que la pulsation elle-même. Nous renvoyons, sur ce point, à la thèse de Suc, p. 55.

2° APPAREILS AVEC RÉCIPIENT CONTENANT DE L'AIR

Pléthysmographe gazométrique de Mosso. — Mosso a substitué cet appareil à son ancien pléthysmographe à contenu liquide. La main est introduite dans une bouteille sans fond ou un gant de gutta-percha et l'occlusion obtenue avec du mastic de vitrier; le pied peut de même être enfermé dans une botte de gutta-percha. Les récipients ne contiennent que de l'air.

Mosso mesure et inscrit les déplacements de l'air au moyen d'un dispositif particulier. Supposons un gonflement de l'organe exploré : l'air déplacé passe dans un tube qui traverse le fond d'un vase de verre contenant un liquide très léger : éther de pétrole ou éther éthylique. Ce tube s'élève verticalement au delà du liquide. L'extrémité du tube est coiffée d'une cloche formée par un très léger cylindre métallique, dont le poids est neutralisé par un contre-

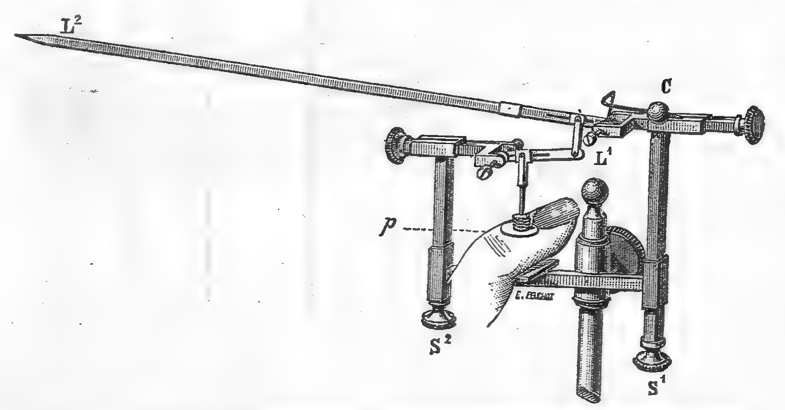


Fig. 396. — Nouveau sphygmographe volumétrique à double levier amplificateur.

poids ; celui-ci porte un index qui écrit sur un cylindre tournant autour d'un axe vertical. A tout gonflement de l'organe exploré répondent donc un soulèvement de la cloche par l'air déplacé, un abaissement du contrepoids et de sa plume et, partant, un tracé à ligne descendante (*Arch. ital. de biol.* 1884).

3° APPAREIL A INSCRIPTION DIRECTE

Sphygmographe volumétrique à double levier amplificateur de François Franck. — Cet appareil, désigné encore par son auteur sous le nom de *sphygmographe totaliseur*, consiste essentiellement en un système articulé formé de deux leviers, combinés de telle sorte que le supérieur amplifie un grand nombre de fois les mouvements de l'inférieur. Celui-ci repose, par l'intermédiaire d'une petite plaque articulée P, sur un point quelconque de la face dorsale d'un doigt, mais de préférence sur le dos de la phalangette. La pulpe du doigt est appliquée sur un plan résistant, dans un moule de gutta qui l'immobilise. On charge d'un certain poids, au moyen de rondelles de plomb, la plaque collectrice P. La fixité du doigt exploré étant indispensable, l'auteur avait moulé une gouttière en gutta-percha dans laquelle reposaient la face antérieure de l'avant-bras gauche, la face palmaire de la main et celle des doigts séparés les uns des autres par un léger relief du moule (fig. 396) (*Arch. de physiol.*, janv. 1890, p. 118).

4° APPAREILS A PAROI ÉLASTIQUE

Pléthysmographe digital de Hallion et Comte. — L'appareil est destiné à explorer les variations de volume d'un doigt. Il comprend deux modèles.

A. *Modèle à ampoule semi-rigide.* — La figure 397 en montre une coupe schématique. ABC est un doigt de gant en caoutchouc, volumineux, de forme cylindrique, à parois épaisses de 1 millimètre au moins et, par conséquent, assez résistantes à la déformation. Ce doigt de gant est clos à sa base par un diaphragme percé d'un orifice central, orifice sur lequel s'insère un tuyau de caoutchouc DE. Autour de l'ampoule en doigt de gant est une gaine de tissu souple, mais inextensible : cuir, drap ou toile. La partie droite de la figure montre un doigt introduit dans l'appareil. Si ce doigt vient à augmenter de volume, il ne peut le faire qu'en déprimant davantage la paroi BC de l'ampoule ; s'il diminue de volume, la paroi BC de l'ampoule, en vertu de son élasticité, le suit dans son retrait ; dans le premier cas, la cavité de l'ampoule est resserrée ; elle est dilatée dans le second. En reliant un tambour de Marey au tube DE, on inscrit ces variations.

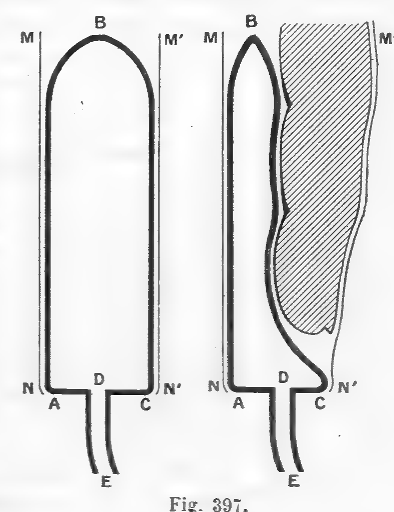


Fig. 397.

On peut aisément, pourvu que la gaine extérieure soit assez ample, intro-

duire dans cet appareil deux doigts ensemble. On peut aussi pourvoir à la fois plusieurs doigts de pléthysmographes appropriés, et collecter les indications en faisant converger leurs tubes abducteurs en un tube unique. Enfin, on peut tenir l'ampoule entre les cinq doigts réunis en cône, et coiffer ce cône d'une gaine inextensible; c'est ainsi que MM. Binet et Courtier ont employé notre appareil dans leurs recherches de physiologie expérimentale.

Nous avions d'abord employé un modèle de pléthysmographe un peu différent de celui que je viens de décrire; nous l'avons délaissé pour l'exploration du volume des doigts ; j'en indiquerai néanmoins le mode de fabrication, car il trouve son emploi dans l'exploration d'une foule d'organes.

B. *Modèle à valves élastiques.* — Pour confectionner une valve, on taille dans une plaque de liège une mince gouttière dont la concavité loge aisément un doigt de la main ; on enduit cette gouttière de paraffine en la plongeant dans un bain de paraffine fondue ; la paraffine une fois concrétée, par le refroidissement, en une couche mince, on introduit la gouttière dans un manchon de caoutchouc d'un calibre tel, que la portion du manchon qui forme un pont d'un bord à l'autre de la gouttière soit modérément tendue ; on pose, sur chacun des bouts du manchon, au ras de l'extrémité de la gouttière, une ligature circulaire, mais après avoir introduit, dans l'un d'eux, un petit tube de verre ; on immerge le tout dans de l'eau chaude, la paraffine alors se liquéfie et fait adhérer la face dorsale de la gouttière à la portion du manchon de caoutchouc qui lui correspond. Finalement, on obtient un appareil clos, n'ayant d'autre voie d'abduction que le tube de verre, et constitué par une gouttière que sous-tend une membrane de caoutchouc. On accouple deux appareils semblables en adossant l'une à l'autre leurs membranes, et on les attache ensemble par des liens circulaires, de façon à constituer, somme toute, une façon de cylindre cloisonné dans sa longueur par une membrane élastique double ; on accouple aussi, par un tube en Y, les deux tubes de verre abducteurs. En aspirant l'air contenu dans l'appareil ainsi constitué, on voit les deux membranes de caoutchouc se séparer l'une de l'autre pour s'accoler chacune au fond de sa gouttière ; on peut alors introduire aisément le doigt entre les deux membranes écartées ; on supprime, finalement, le vide dans l'appareil, et les deux membranes viennent s'accoler au doigt introduit dans leur intervalle. Il ne reste plus qu'à relier le tube en Y à un tambour inscripteur, pour obtenir les tracés volumétriques du doigt inclus.

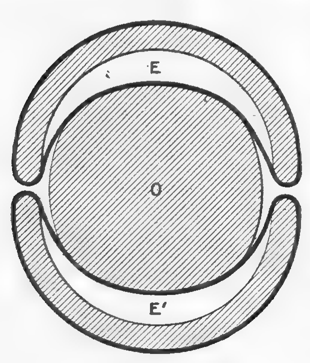


Fig. 398.

La figure ci-jointe montre une coupe schématique de l'appareil posé sur le doigt O ; les espaces EE', limités d'un côté par la gouttière rigide, de l'autre par la membrane de caoutchouc que déprime le doigt, communiquent, par un tube en Y, entre eux et avec le tambour inscripteur.

Des appareils, semblables à ceux que je viens de décrire, peuvent être

aisément adaptés à toutes sortes d'organes : on élargira, au besoin, les gouttières, on modifiera leurs dimensions, ou bien on disposera le squelette intérieur de l'appareil, squelette formé à volonté de liège, de métal ou de toute autre substance, en forme de valve, de coquille, etc., tout cela suivant la forme et le volume de l'organe qu'il s'agit d'explorer. Ajoutons qu'on peut se contenter d'une seule gouttière, d'une seule valve à membrane, appliquée sur une des faces de l'organe, pourvu que la face opposée soit maintenue par une valve pleine ou une plaque de soutien quelconque, d'une forme et d'une dimension appropriées à celles de l'organe.

J'ai expérimenté les divers appareils classiques dont j'ai donné ci-dessus la description, et j'ai pu leur reconnaître de sérieux inconvénients pratiques; c'est pour y remédier que j'ai été conduit à étudier, avec Comte, un pléthysmographe d'un modèle nouveau. Ces inconvénients sont divers :

1° Ils exigent, de la part du sujet soumis à l'expérience, une immobilité souvent difficile à obtenir. En effet, l'appareil étant fixe, tout mouvement du membre exploré modifie plus ou moins les rapports réciproques du membre et de l'appareil, et modifie, par le fait même, le tracé volumétrique. Cet inconvénient s'atténue un peu, mais d'une manière insuffisante, lorsque l'on suspend le récipient, comme l'ont recommandé Fr. Franck et Mosso. Il s'atténue beaucoup avec les récipients contenant de l'air qu'a employés, en dernier lieu, Mosso, mais encore est-il facile de comprendre qu'on ne peut modifier considérablement la position de la main dans l'espace sans changer ses rapports avec le récipient qui l'inclut ; de plus, l'interposition d'une grande masse gazeuse entre l'organe exploré et le tambour inscripteur peut émousser les indications fournies par celui-ci.

2° Il est assez difficile d'en assurer l'occlusion, surtout si on opère, non pas sur un sujet unique, mais sur des sujets différents, ayant des membres de tailles différentes. Pour que la membrane de caoutchouc serre juste assez, et ne serre pas trop, il faut qu'elle ait une ouverture appropriée au calibre du membre exploré; il est dès lors nécessaire qu'on ait à sa disposition une série de manchons interchangeables. Quant à l'occlusion réalisée avec du mastic, un mouvement risque de la compromettre. Le sphygmographe totaliseur de François Franck présente un désavantage du même ordre : il comporte la confection d'une gouttière moulée sur le doigt qu'il s'agit d'explorer.

3° Ce dernier appareil ne peut fournir de tracé que sur un cylindre enregistreur à grand axe vertical. Il en est de même pour les procédés d'inscription imaginés par Mosso.

Tels sont les principaux désavantages que nous avons cherché, Comte et moi, à éluder.

II. — PLÉTHYSMOGRAPHIE CHEZ L'ANIMAL

Autant d'organes divers, autant de formes de pléthysmographes. Je ne décrirai pas avec détail chacun des appareils employés, mais seulement quelques types spéciaux.

J'indiquerai notamment, à propos du pléthysmographe intestinal, la manière dont on peut procéder vis-à-vis d'un organe doué de contractilité, pour éviter de considérer comme variations de volume de simples changements de forme.

J'indiquerai aussi, à propos du corps thyroïde, comment on parvient à amplifier des variations de volume qui seraient trop faibles pour s'inscrire par les procédés habituels.

Pattes. — Tous les appareils employés à l'exploration du volume des extrémités chez l'homme sont applicables ici, moyennant les modifications de forme et de volume convenables. On a de bons résultats avec un petit bocal de verre contenant de l'air ; l'occlusion est réalisée à l'aide d'un manchon de caoutchouc dont l'adhérence est rendue parfaite à l'aide de la solution de gutta-percha. M. Wertheimer s'est servi d'un système d'ampoules conjuguées qui lui a donné de bons tracés (1).

Pénis. — Même genre d'appareil, au moins chez le chien. (Voy. Fr. Franck, *Arch. de physiol.*, janvier 1895.) Le prépuce est lié sur le pourtour d'un tube qui engaine le gland.

Fosses nasales. — On ferme l'orifice postérieur des fosses nasales par un tampon, comme cela se pratique chez l'homme dans le cas d'épistaxis incoercible. On choisit un tube de caoutchouc dont le calibre extérieur est un peu supérieur au calibre intérieur de l'orifice nasal antérieur. Pinçant entre les deux mors d'une pince hémostatique un bout du tube de caoutchouc, on exerce une traction sur l'autre bout ; on étire ainsi le tube : on introduit alors dans la narine l'extrémité pincée. Enfin, le tube une fois en place, on le laisse reprendre sa forme et par conséquent augmenter de diamètre, de sorte qu'il tient dans l'orifice nasal à frottement dur ; on retire la pince. La fosse nasale constitue dès lors un appareil clos, qu'on peut relier à un tambour de Marey pour juger des variations d'épaisseur de la muqueuse.

Pléthysmographe auriculaire. — On enroule l'oreille autour d'un bâton de cire à modeler auquel on impose une forme convenable, et on inclut le tout entre deux valves à membranes de caoutchouc.

Pléthysmographe rénal. — L'appareil classique pour l'exploration du rein est l'*oncographe* de Ch. Roy, qui a permis un grand nombre de recherches très intéressantes. Cet appareil est constitué par deux valves sur les bords desquelles s'insère une membrane de baudruche ; ces deux valves sont articulées de telle sorte qu'une fois adaptées l'une à l'autre, elles enveloppent complètement l'organe, à part son pédicule. Entre la face concave de chaque valve et la membrane de baudruche correspondante, est un espace clos, qui communique seulement avec l'espace semblable de l'autre valve ; le rein, sur lequel se moulent les deux membranes de baudruche, ne peut

(1) *Arch. de physiol.*, 1884, p. 724. — La plupart des appareils que nous avons décrits et que nous allons décrire peuvent être ainsi pourvus d'une ampoule. Au lieu de relier directement, par exemple, la cavité de notre pléthysmographe digital à un tambour de Marey, on peut la relier à la cavité d'une ampoule de caoutchouc pareille au sphygmoscope de Chauveau et Marey ; on inscrit les variations de cette ampoule, qui sont elles-mêmes commandées par les variations de l'organe exploré. Ce dispositif permet d'exercer sur l'organe des compressions assez fortes, ce qui est parfois utile.

changer de volume sans modifier ce double espace clos, qui communique avec un appareil inscripteur.

Notre pléthysmographe à valve de caoutchouc, décrit ci-dessus, présente, avec l'instrument de Ch. Roy, des analogies qu'il est juste de reconnaître. Nous le préférons, comme étant d'un emploi plus facile.

Il s'applique on ne peut mieux à l'étude de la circulation rénale. On se sert de deux valves à membrane de caoutchouc, serrées par deux anses de fil passant de chaque côté du pédicule du rein, et croisant perpendiculairement le grand axe de l'organe et des deux valves. On fait en sorte de ne pas comprimer le pédicule vasculaire de l'organe.

Nous avons construit aussi, pour maintenir les deux valves, une sorte de pince semblable à celle que nous allons décrire pour le pléthysmographe labial; nous avons également employé à cet effet un système à emboîtement réciproque qu'il serait trop long de décrire.

Pléthysmographe lingual. — On peut explorer les variations de volume de l'organe, et même les variations de chacune de ses moitiés, à l'aide d'un appareil qui sera décrit dans un prochain numéro des *Archives de physiologie*.

Qu'on imagine deux planchettes ayant à peu près la largeur de la langue; l'une de ces planchettes est appliquée sur la face supérieure de l'organe, l'autre, échancrée en arrière pour donner place au frein de la langue, repose sur la face inférieure; qu'on imagine maintenant, creusées dans la face inférieure de la planchette supérieure, deux gouttières longitudinales, séparées par une crête médiane; qu'on se représente, enfin, logées et fixées dans chacune de ces gouttières, deux ampoules de caoutchouc à paroi un peu résistante: telle est la structure de notre pléthysmographe lingual. Il suffit, pour en compléter la description, d'y ajouter deux cordons qui relient les deux plaques de bois: l'un de ces cordons s'insère, par ses extrémités, sur les deux angles de la plaque inférieure, et forme une anse à concavité inférieure qui maintient la plaque supérieure appliquée sur la langue; l'autre, proche de l'extrémité antérieure des deux plaques, les enveloppe d'un anneau complet.

Suivant le volume de l'animal, on prend un appareil plus ou moins grand, et on serre plus ou moins les cordons.

Si la crête longitudinale médiane de la plaque supérieure est assez saillante, et l'appareil assez serré, on peut comprimer la langue suivant son raphé, et en isoler ainsi les deux moitiés l'une de l'autre.

Pléthysmographe splénique. — On emploie deux valves très longues et assez larges, entre lesquelles on inclut l'organe comme il vient d'être dit pour le rein, mais en ayant soin de peu comprimer le tissu.

Il faut avoir soin d'inclure dans l'appareil la totalité de l'organe, sinon la partie qui est en dehors risque de se congestionner beaucoup; vienne alors une vaso-constriction énergique, et la partie congestionnée déverse son contenu dans la partie qui est comprise entre les valves. Résultat: augmentation de volume de cette dernière, qu'on prendrait à tort pour une vaso-dilatation authentique.

Pareille cause d'erreur n'est pas absolument spéciale à la rate, mais c'est

là qu'elle se montre avec le plus de netteté. Il convient d'en être prévenu.

M. Roy a appliqué à la pléthysmographie splénique un oncographe analogue à son oncographe rénal.

Pléthysmographe labial. — Qu'on se figure une pince, dont les mors peuvent être rapprochés ou écartés à volonté à l'aide d'une vis de rappel ; qu'on se figure ensuite, fixée à l'extrémité de chaque mors, et suivant une direction perpendiculaire à celle des branches de la pince, une valve à paroi élastique semblable à celles qui constituent notre deuxième modèle de pléthysmographe digital. Les deux valves se regardent par la concavité de leurs gouttières.

Posons cet appareil sur une moitié de la lèvre inférieure, de manière que celle-ci soit comprise entre les deux valves, et serrons la pince. Relions les deux valves par un tube en Y. Voilà notre appareil en place.

J'ajoute que les deux valves sont légèrement inclinées l'une sur l'autre, de telle sorte que leurs bords supérieurs, qui répondent, dans l'exemple choisi, au bord de la lèvre, se rejoignent presque, tandis que leurs bords inférieurs conservent un écartement suffisant pour ne pas comprimer la base même de la lèvre au point d'entraver la circulation.

Pareil dispositif pourrait être appliqué chez l'homme.

Pléthysmographe intestinal. — Il est impossible d'appliquer à l'intestin l'appareil à doubles valves élastiques : on s'exposerait à prendre des indications myographiques pour des indications vaso-motrices.

Aussi avons-nous dû, M. François Franck et moi (1), recourir à un dispositif spécial. Nous avons employé deux procédés, dont la description est un peu longue, mais qu'il n'est peut-être pas sans intérêt de rapporter : ils trouveraient peut-être d'autres applications, quand il s'agirait d'éviter une caus d'erreur similaire.

Appareil volumétrique à déversement avec mesure du débit du liquide déplacé. — Avec la préoccupation d'éviter toute compression des vaisseaux mésentériques, nous avons employé l'immersion d'une ou de plusieurs anses intestinales, munies de leur mésentère, dans un large vase rempli d'eau salée tiède. L'intestin se logeait à la partie supérieure du récipient, sans exercer de traction sur les vaisseaux, et la circulation s'y opérait avec une parfaite régularité. On pouvait voir, par transparence, les changements de coloration et de vascularisation de la surface intestinale et les variations de calibre des vaisseaux mésentériques ; mais l'appareil était surtout destiné à fournir l'inscription des changements de volume de la masse vasculaire qu'il contenait ; dans ce but, nous en avions fait un appareil à déversement Le niveau du liquide était maintenu constant, grâce à l'apport rigoureusement réglé d'eau salée chaude, fournie par un vase de Mariotte qui se déversait par gouttes dans l'appareil ; un tube d'écoulement, disposé de façon que son orifice extérieur fût exactement sur le même plan que le niveau du liquide dans l'appareil, débitait un nombre de gouttes exactement semblable à celui que fournissait le vase de Mariotte ; le volume des gouttes étant le même de part et d'autre, la constance du niveau était assurée.

(1) *Arch. de physiol.*, avril 1896, p. 478 et 493.

Le contrôle de l'appareil avait été obtenu en montrant que l'addition de la moindre masse liquide ou solide produisait tout aussitôt une augmentation dans le nombre des gouttes qui s'écoulaient par l'orifice de déversement;

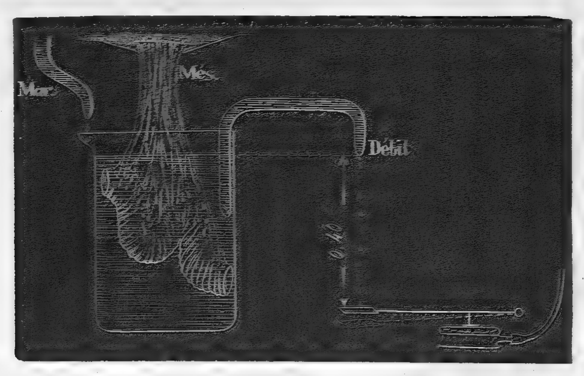


Fig. 399. — Appareil volumétrique à déversement. — L'intestin soutenu par son mésentère (*Més.*) est immergé dans un vase dont le niveau reste constant si les vaisseaux ne changent pas de volume. Un vase de Mariotte déverse goutte à goutte dans le récipient, sans imprimer de mouvements au liquide, de l'eau salée tiède qui se déverse à mesure en quantité équivalente par le tube de débit. Les variations de volume produites par les changements de calibre des vaisseaux intestinaux font varier le nombre des gouttes qui s'écoulent de l'appareil et s'enregistrent au moyen de la palette oscillante d'un tambour à air sur laquelle elles tombent d'une hauteur de 30 à 40 centimètres.

réciproquement, l'aspiration d'une très petite quantité de liquide déterminait une diminution dans les gouttes de sortie; cet écoulement s'enregistrait au moyen de la palette oscillante d'un tambour à levier, suivant le procédé

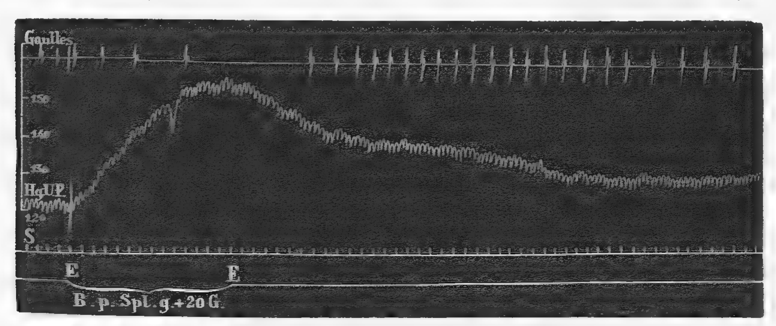


Fig. 400. — Résultats fournis par l'appareil à déversement. — L'excitation du bout périphérique du splanchnique gauche fait resserrer les vaisseaux abdominaux comme le montre l'élévation de la pression aortique (*Hg. U. F.*) de 120 à 155 millimètres Hg; cette vaso-constriction produit une diminution de volume des vaisseaux mésentériques qui s'accuse par la diminution du nombre des gouttes, puis par leur suppression quand la vaso-constriction est à son maximum.

autrefois indiqué par M. Marey et employé depuis par nombre d'expérimentateurs. Nous avons donné à ce mode de comptage la préférence sur le déplacement d'un flotteur, plus difficile à régler rigoureusement et donnant moins fidèlement l'indication des variations minimes dans le niveau du liquide (fig. 399).

En appliquant cet appareil à déversement d'une grande sensibilité à l'étude des variations de calibre des vaisseaux intestino-mésentériques, nous avons obtenu d'assez bonnes indications, comme le montre la figure ci-jointe (fig. 400).

Appareil volumétrique intestinal à déplacement. — Une anse intestinale est attirée hors de l'abdomen, l'animal étant couché sur le dos ; elle est séparée du reste de l'intestin par une section faite entre deux gros fils à ligature qui ne coupent pas la paroi et elle reste en rapport avec un large repli mésentérique. Ainsi préparée, cette anse est introduite dans le large goulot d'un flacon de verre, dont le fond a été remplacé par un bouchon de caoutchouc percé de plusieurs trous. L'orifice d'entrée est muni d'une membrane souple de caoutchouc, se prolongeant sous la forme d'un tube aplati qui s'applique sur le mésentère, en l'accompagnant sur une étendue de plusieurs centimètres ; cette membrane peut s'invaginer sur elle-même, de façon à constituer un cul-de-sac qui assure l'herméticité de l'appareil, sans qu'aucune compression soit exercée à la surface du mésentère ; on engage dans l'orifice de la membrane tubulaire, en même temps que le repli mésentérique, un paquet graisseux épiploïque, formant un coussin souple sur lequel s'applique la membrane ; le diamètre de l'orifice est rétréci à volonté au moyen d'une pince à pression continue (fig. 401). L'herméticité de l'appareil se démontre par la constance du niveau de l'eau salée qu'on y verse par l'une des tubulures de la partie supérieure. Ainsi disposé, le paquet intestino-mésentérique flotte dans le bain liquide et la circulation continue à s'y effectuer correctement, toute traction et toute torsion du mésentère étant soigneusement évitées et l'appareil étant maintenu par un support dans une position fixe.

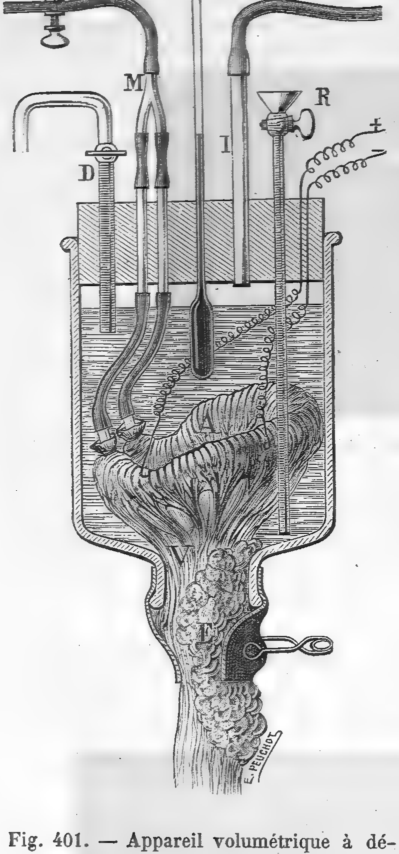


Fig. 401. — Appareil volumétrique à déplacement. — Une anse intestinale (A), munie de son mésentère (V) qui est accompagné d'un paquet graisseux épiploïque (E), flotte dans un bain d'eau salée contenu dans un large récipient. Celui-ci est hermétiquement clos à la partie inférieure au moyen d'un collier de caoutchouc souple légèrement serré par une pince ; il porte en haut un large bouchon laissant passer un tube de remplissage (R) et un tube de déversement (D). Les deux extrémités de l'anse intestinale sont ordinairement ouvertes dans le liquide, mais, pour explorer les mouvements, on peut les faire communiquer avec un appareil inscripteur par le double tube M (myographe intestinal). Un thermomètre indique la température du bain. Les changements de volume des vaisseaux sont enregistrés par l'intermédiaire du tube I, qui communique avec la caisse à air réservée au-dessus du niveau du bain liquide.

Ce dispositif peut être complété par la fixation d'un tube à chaque extrémité de l'anse intestinale ; les deux tubes s'unissent au dehors, mettant ainsi la cavité de l'intestin, qu'on a au préalable débarrassée de ses mucosités par un lavage à l'eau salée, avec un tambour enregistreur ; les contractions peuvent être, de cette façon, inscrites en même temps que les changements de volume des vaisseaux, non seulement dans le but de contrôler la signification vasculaire des courbes obtenues, mais aussi pour étudier les contractions intestinales elles-mêmes ; c'est un véritable myographe intestinal qui se trouve ainsi réalisé. Des deux fils électriques engagés dans le bouchon, l'un aboutit à la surface de l'intestin, l'autre se noie dans le bain salé, de manière à permettre de pratiquer des excitations directes sans rien déranger dans l'appareil. Au-dessus du niveau du liquide, reste ménagée une chambre à air qui communique par le tube I avec un tambour enregistreur. Celui-ci indique les variations de volume des vaisseaux immergés dans le bain salé, et inscrit ses courbes à côté de celles des contractions si celles-ci se produisent. On peut introduire dans le liquide un thermomètre et le tube R lors de la mise en place, de façon à permettre le remplissage en laissant l'air s'échapper au dehors par le tube D. On maintient l'intestin à une température modérée et à peu près constante ; l'écart de 1 ou 2 degrés au cours de l'expérience ne présente pas d'importance.

Pléthysmographe thyroïdien. — Inscription avec relai amplificateur. — Pendant que cet article était sous presse, M. Briau, élève de M. Morat, a appliqué la pléthysmographie à l'étude des vaso-moteurs du corps thyroïde ; il a employé un appareil très analogue à notre pléthysmographe à double valve. Dans le même temps, nous poursuivions, M. François Franck et moi, de semblables recherches. Nos résultats encore inédits (en partie seulement utilisés par M. François Franck dans une étude sur la thyroïdectomie : *Acad. de méd.* 1899), ne concordent pas avec ceux qu'a obtenus M. Briau. La raison en est sans doute dans la difficulté qu'on éprouve à obtenir des courbes de suffisante amplitude avec des organes de très faible volume.

Nous avions, quant à nous, tourné la difficulté à l'aide du dispositif que je vais sommairement décrire.

Dans des recherches que j'ai pratiquées en 1891 sur des malades à la Salpêtrière, j'avais employé, à défaut d'un appareil enregistreur un appareil *indicateur* des variations de volume : c'était tout simplement un tube de verre de petit calibre dans lequel se déplaçait un index liquide. Ce tube s'ouvrait à l'air libre par une extrémité, et par l'autre il communiquait avec un pléthysmographe digital formé d'un tube de verre engainant un doigt. L'index liquide montait ou descendait, suivant que le volume du doigt augmentait ou diminuait. MM. Klippel et Dumas, depuis lors, ont imaginé un dispositif de ce genre. La figure 402 représente l'appareil employé.

Le tube de transmission qui reliait le tube de verre au pléthysmographe portait sur son trajet un robinet à trois voies qui permettait, suivant son orientation, de faire communiquer à volonté, avec sa tubulure latérale, soit le récipient digital, soit le tube de verre, soit les deux. De plus, la tubulure latérale pouvait être mise en relation avec une petite seringue. A l'aide de

celle-ci, on pouvait aspirer un index liquide d'une longueur convenable et amener ou ramener cet index, par aspiration ou refoulement d'air, à un niveau quelconque. Cet appareil fonctionnait bien, à condition que l'on évitât la formation d'index liquides multiples constituant un chapelet capillaire et aussi la formation d'une gouttelette à l'orifice libre du tube : ces deux conditions, mettant en jeu des forces capillaires, feraient obstacle au déplacement de l'index observé.

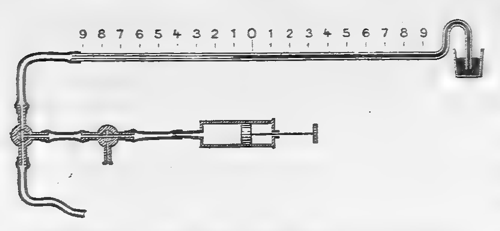


Fig. 402. — Appareil indicateur des variations de volume.

On pouvait encore donner à l'extrémité du tube de verre une coudure telle, que son orifice plongeât dans un liquide coloré. L'index de tout à l'heure était remplacé alors par une colonne liquide continue, et comme celle-ci offrait plus d'inertie que celui-là, on n'observait plus alors que les variations lentes du volume du doigt : les pulsations, trop brèves, ne se marquaient plus qu'à peine, et cessaient de troubler l'exploration de certaines ondulations vaso-motrices.

Nous avons eu l'idée (que MM. Morat et Briau ont eu de leur côté) d'observer de la même manière les variations de volume du corps thyroïde : l'appareil fournit des indications très délicates et une amplification beaucoup plus grande que n'en donne un tambour de Marey. Mais les indications amplifiées ainsi obtenues, nous avons réussi à les inscrire, M. François Franck et moi, à l'aide d'un procédé fort simple.

Le tube indicateur était posé à plat sur une table. Derrière lui, à quelque distance, était fixé un tambour de Marey, pourvu d'un long style et disposé de telle sorte que l'extrémité du style, constitué par une mince aiguille, venait croiser perpendiculairement le tube indicateur. Un aide observait constamment le niveau marqué par ce dernier et faisait suivre au style les oscillations de ce niveau. Ainsi se produisaient, en définitive, dans le tambour de Marey, des variations de volume solidaires de celles de l'organe. Ce tambour jouait enfin le rôle de récepteur vis-à-vis d'un autre tambour qui était inscripteur.

Ce système de *relais amplificateurs* permettait d'obtenir des courbes extrêmement démonstratives dans des cas où l'inscription directe ne donnait aucun résultat appréciable.

Organes divers. — On peut inscrire le volume des organes les plus variés en plaçant ces organes, en totalité ou en partie, entre deux valves à membranes de caoutchouc, ou bien entre une valve à membrane de caoutchouc et une feuille de métal malléable à laquelle on a donné la forme qui convient pour épouser la surface de l'organe.

C'est ainsi qu'avec M. François Franck, j'ai inscrit les variations de volume du foie (1), du pancréas (2), de la glande sous-maxillaire, de lobes pulmonaires, de certains muscles, du cerveau, etc.

(1) *Arch. de physiol.*, oct. 1896.
(2) *Ibid.*, juillet 1897.

Il serait superflu de décrire ici les appareils employés pour ces diverses opérations. Ce sont toujours les appareils à valves dont la forme et le volume étaient appropriés à chaque cas particulier. J'ajoute qu'il n'est pas toujours utile d'employer deux valves : on peut également serrer l'organe entre une valve et une plaque ou une gouttière métallique. Au lieu d'une valve en forme de gouttière, on peut utiliser une coquille semi-ovoïde, etc. Il est facile d'imaginer et même de construire, sur le même type essentiel, des appareils de formes très diverses.

CAPILLARITÉ ET TENSION SUPERFICIELLE

Par M. A. IMBERT

Cause première et importance biologique des phénomènes. — Les phénomènes de capillarité et de tension superficielle sont engendrés par des actions réciproques qui s'exercent entre les molécules d'un même liquide ou entre les molécules situées de part et d'autre de la surface de contact, soit de deux liquides non miscibles, soit d'un solide et d'un liquide qui n'exercent l'un sur l'autre ni action chimique, ni action d'imbibition ou de dissolution.

Cette catégorie de phénomènes physiques a été l'objet de très nombreuses recherches, tant théoriques qu'expérimentales, et a, en particulier, exercé la sagacité des grands géomètres qui ont nom Laplace (1), Gauss (2), Bertrand (3), etc.

De cet ensemble de travaux, on a pu déduire une théorie élémentaire, la seule dont nous parlerons, théorie dont le principe et les conséquences s'accordent également bien, d'une part avec la théorie mathématique, d'autre part avec les innombrables faits expérimentaux auxquels donnent naissance les forces moléculaires, cause première de ces phénomènes.

Les phénomènes de capillarité et de tension superficielle interviennent, en outre, dans la production d'un grand nombre de faits dont l'étude est du ressort de la Physique biologique, et la théorie doit donc en être donnée dans cet ouvrage.

Tension à la surface d'un liquide. — Si l'on considère une molécule *m* (fig. 403) située au sein d'un liquide en équilibre, cette molécule est soumise, de la part de toutes les molécules voisines, situées à une distance très petite et inférieure à ce que l'on appelle *rayon de la sphère d'activité*, à des actions attractives qui, par raison de symétrie, se détruisent mutuellement deux à deux. Mais il n'en sera pas de même si l'on considère une molécule *m'* située, par rapport à la surface MN du liquide, à une distance inférieure à ce même rayon de la sphère d'activité, car la symétrie précédente n'existe plus.

L'analyse des effets des forces moléculaires dont il vient d'être question, dans la couche superficielle d'épaisseur égale au rayon de la sphère d'activité,

(1) Laplace, Supplément au Livre X de *la Mécanique céleste*. Paris, 1807.
(2) Gauss, *Commentationes societatis scientiarum Gottingenses recentiores*, VII, 1822.
(3) Bertrand, *Journal de Liouville*, XIII, 1832.

conduit à conclure que cette couche liquide est dans un certain état de tension.

En d'autres termes, les choses se passent comme s'il existait, à la surface, une mince membrane élastique tendue enveloppant toute la masse liquide, offrant une certaine résistance à la rupture. et capable de se reformer lorsqu'elle a été rompue et que la cause de la rupture a cessé d'agir.

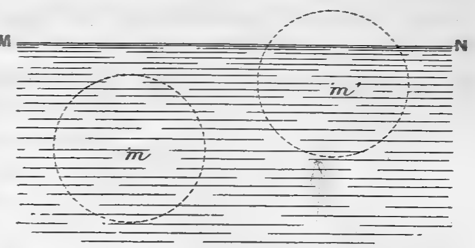


Fig. 403. — Origine de la tension superficielle des liquides.

L'état de tension et la résistance à la rupture de la couche liquide superficielle dépendent d'ailleurs de l'intensité des forces moléculaires agissantes, et par suite de la nature du liquide. Cette résistance, constante dans toutes les directions que l'on peut choisir à la surface du liquide, comme nous le démontrerons plus bas, considérée sur une longueur de 1 millimètre et évaluée en milligrammes, a reçu le nom de *tension superficielle* du liquide.

La tension superficielle ainsi définie est une constante physique, au même titre que la densité, la chaleur spécifique, la conductibilité électrique, etc.

Le défaut de symétrie qui existe, quant aux actions moléculaires exercées, lorsque l'on considère une molécule liquide située à une distance de la surface libre inférieure au rayon de la sphère d'activité, et qui engendre l'état de tension sur cette surface, ne disparaît pas si le liquide considéré A est en contact par sa surface, soit avec un autre liquide B, soit avec un corps solide C; en effet, les actions, que les molécules de B ou de C exercent alors sur celles de A, ne sont pas, en général, identiques à celles que les molécules du premier liquide exercent entre elles. La même cause devant forcément produire les mêmes effets, une certaine tension doit exister encore à la surface de contact de deux liquides non miscibles, ou d'un liquide et d'un solide.

Preuves expérimentales de l'existence de la tension superficielle. — On peut montrer de bien des manières, par l'expérience, la réalité d'une certaine tension à la surface des liquides.

1° On remplit d'eau, jusqu'en AD (fig. 404), une cuve quadrangulaire à fond plat ABCD, dont la paroi CD, mobile autour de sa base C, est maintenue en place, d'une part, au moyen d'une cale en bois C qui l'empêche de s'abaisser, d'autre part, grâce au fil DE qui l'empêche de se relever.



Fig. 404. — Expérience de Dupré montrant l'existence de la tension superficielle.

Si l'on vient à brûler le fil DE, la paroi CD, sous l'influence de la couche liquide superficielle, vient en CD' malgré la pression hydrostatique qui s'exerce sur cette paroi et qui tend à s'opposer à son mouvement (Dupré).

2° Si l'on enfonce une baguette de verre dans une masse de mercure dont la surface libre a été préalablement saupoudrée de lycopode, on voit les

grains de poudre se rapprocher progressivement du point où la baguette plonge dans le liquide et disparaître chacun à leur tour, puis reparaître de nouveau progressivement et s'étaler, à mesure que la tige de verre est retirée (Pasteur). Le phénomène est donc identique à celui qui se produirait si le mercure était enveloppé d'une membrane résistante que le verre déformerait sans la rompre et qui reprendrait ensuite sa position primitive.

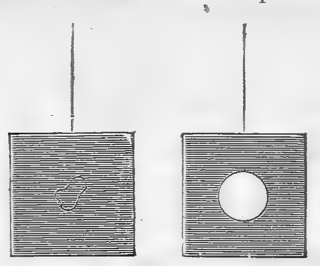


Fig. 405 et 406. — Egalité de la tension superficielle dans toutes les directions.

3° Un fil très fin de soie, dont les deux extrémités sont réunies, déposé à la surface d'une masse d'eau y prend la forme d'une courbe fermée irrégulière (fig. 405). Mais si l'on dépose à l'intérieur du fil une goutte d'un second liquide capable de diminuer la tension superficielle de l'eau, le fil se tend aussitôt suivant une circonférence de cercle. Le changement de forme est dû à ce que chaque point du fil est alors soumis à une force, dirigée vers l'extérieur de la courbe fermée que ce fil forme et égale à la différence qui existe entre la tension superficielle de l'eau, non modifiée à l'extérieur de l'espace limité par le fil, et la tension superficielle diminuée à l'intérieur de cet espace. La forme circulaire que prend alors le fil montre d'ailleurs la constance de la tension suivant toutes les directions à la surface libre du liquide.

L'expérience réussit d'ailleurs beaucoup plus facilement si l'on projette le fil, non plus à la surface libre d'une masse liquide, mais sur une lame liquide isolée (fig. 406) (Van der Mensbrugghe) (1).

(1) Le liquide dont se servait Plateau pour obtenir des lames liquides persistantes était préparé en faisant dissoudre 25 grammes de savon de Marseille frais dans 1 litre d'eau, puis

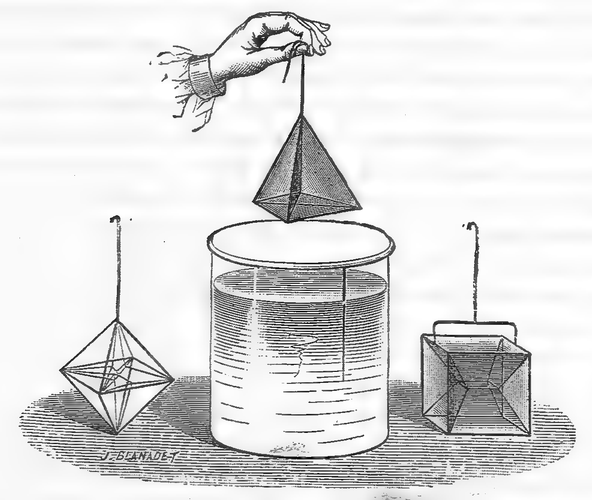


Fig. 407. — Edifices lamellaires de Plateau.

en mélangeant trois volumes de ce liquide avec deux volumes de glycérine pure. Terquem s'est servi d'un liquide préparé en faisant dissoudre 300 grammes de sucre dans un litre d'eau con-

4° L'existence de la tension superficielle à la surface du contact de deux liquides non miscibles est démontrée par l'expérience suivante due à Plateau.

On introduit, au moyen d'une pipette ou d'une seringue recourbée (fig. 408), une certaine quantité d'huile au sein d'un liquide hydroalcoolique ayant même densité que l'huile. Celle-ci est dès lors en quelque sorte soustraite à l'action de la pesanteur et doit prendre par suite une forme uniquement réglée par l'action de la tension qui existe à sa surface. Or, la sphère étant, de tous les corps de même volume, celui dont la surface est minima, la tension superficielle devra donner à la masse d'huile la forme sphérique, comme le ferait une membrane élastique qui entourerait entièrement la masse liquide, membrane à laquelle l'action de la tension superficielle est assimilable. L'expérience vérifie pleinement cette prévision.

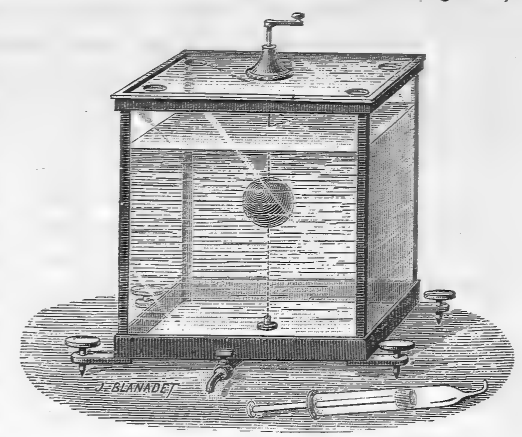


Fig. 408. — Tension superficielle au contact de deux liquides.

Mesure de la tension superficielle. — On peut de plusieurs manières déterminer expérimentalement la valeur numérique de la tension superficielle d'un liquide. Le procédé très simple suivant a été indiqué par M. Van der Mensbrugghe.

Un fil de coton étant tendu horizontalement, on approche, parallèlement à ce fil, un mince tube de verre muni à chacune de ses extrémités d'un anneau en fil de fer et en son milieu d'un plateau en papier, puis l'on passe, entre le fil de coton et le tube de verre, un pinceau imbibé du liquide dont on veut mesurer la tension superficielle f. On détermine ainsi la formation d'une mince lame liquide dont la tension, sur chacune de ses faces, maintient le tube de verre suspendu. Si l'on charge alors de sable le plateau en papier, le tube de verre se détache et tombe au moment où le poids p de ce tube et du sable sera devenu supérieur à la résultante $2lf$ des forces de tension qui s'exercent sur chacune des faces, de longueur l, de la lame liquide interposée. On aura donc, au moment de la chute :

$$p = 2lf,$$

d'où l'on tirera f, si l'on a préalablement déterminé p et l.

tenant 15 grammes de savon de Marseille sec. D'autre part, Gernez a obtenu des lames liquides d'une durée presque indéfinie en ajoutant 30 à 50 pour 100 d'huile de ricin à du collodion. Il suffit de plonger un cadre métallique, circulaire, rectangulaire, etc., dans l'un de ces liquides, puis de le retirer, pour obtenir une lame liquide. En se servant de cadres plus complexes, tétraèdres, cubes, etc., Plateau a obtenu les édifices lamellaires représentés sur la figure 407.

Composante normale de la tension superficielle. — La tension qui existe à la surface libre d'un liquide donne naissance, toutes les fois que cette surface n'est pas plane, à une composante normale à cette même surface, comme le fait, dans les mêmes conditions, une membrane solide élastique à laquelle la couche superficielle du liquide est assimilable.

L'existence de cette composante est démontrée en particulier par l'expérience suivante. Si l'on souffle, en se servant de l'un des liquides dont la composition a été indiquée plus haut, une bulle à l'extrémité d'un tube et que l'on mette celui-ci en communication avec un manomètre, le manomètre accuse un excès de pression dû aux composantes normales qui s'exercent en tous les points de la surface de la bulle. Lorsque le tube s'ouvre librement dans l'atmosphère, la bulle diminue progressivement de diamètre et revient peu à peu sur elle-même jusqu'à disparaître complètement, en chassant l'air qu'elle contient grâce aux composantes normales dues à la tension de la lamelle liquide dont cette bulle est formée.

L'analyse mathématique du phénomène conduit à attribuer à la composante normale N de la tension superficielle, évaluée sur l'unité de surface, la valeur qui résulte de la formule :

$$N = F\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R'}\right),$$

F étant la tension superficielle du liquide définie comme plus haut, R et R′ les rayons de courbure principaux de la surface au point où l'on considère la composante normale.

Dans le cas où la surface liquide est cylindrique, l'un des rayons de courbure principaux devient infini et la valeur de la composante normale se réduit à

$$N = \frac{F}{R}.$$

Si la surface liquide est sphérique, $R = R'$ et la valeur de N devient :

$$N = \frac{2F}{R}.$$

Tension superficielle au contact d'un liquide et d'un solide et de deux liquides. — Nous avons déjà fait remarquer que, si la surface d'un liquide A est en contact avec un solide B ou un autre liquide C, l'existence de molécules matérielles au delà de la surface qui, sans cela, serait libre, a évidemment pour effet de modifier la tension qui existerait sur cette surface. Cette modification ne peut être d'ailleurs qu'une diminution. Si, en effet, les actions moléculaires de B ou de C sur A étaient égales à celles qu'exercent entre elles les molécules de A, la tension superficielle serait annulée comme elle l'est sur toute surface considérée au sein du liquide A ; en général, il est vrai, cette égalité dans les actions moléculaires n'existera pas, mais puisque la tension superficielle résulte de l'existence d'une surface libre, c'est-à-dire de l'absence de molécules matérielles d'un côté de cette surface, si des molé-

cules existent de ce côté, les actions qu'elles exerceront, quelle qu'en soit l'intensité, diminueront évidemment l'intensité du phénomène primitif, c'est-à-dire l'intensité de la tension au contact de A avec B ou C.

Contact solide-liquide. — La tension au contact est diminuée d'une quantité f, par rapport à la tension propre F du liquide, et devient par suite égale à $F-f$; f est d'ailleurs variable avec la nature des corps en présence.

Deux cas peuvent se présenter, suivant que f est plus grand ou plus petit que F.

Dans le premier cas, la tension au contact $F-f$ est négative et tend, non plus à réduire au minimum la surface du liquide, mais au contraire à l'augmenter. Le liquide, déposé en une goutte sur le solide, s'étale; on dit que celui-ci est *mouillé* par celui-là.

Dans le second cas, la tension au contact $F-f$ est positive et agit comme la tension F elle-même, quoique moins énergiquement. L'étalement du liquide, déposé en goutte sur le solide, cesse au moment où, en chaque point de la courbe de raccordement des deux corps en contact, la composante de F suivant la surface du solide est égale à la valeur de la tension superficielle au contact solide-liquide, c'est-à-dire est égale à $F-f$. On dit alors que le solide *n'est pas mouillé* par le liquide.

Contact liquide-liquide. — Lorsqu'on dépose une goutte d'un liquide A à la surface d'un liquide B, la forme d'équilibre de A dépend des valeurs relatives de trois forces qui sont:

Fig. 409. — Equilibre d'une goutte liquide à la surface d'un autre liquide.

La tension F_1 (fig. 409) à la surface libre de A;

La tension F_2 à la surface libre de B;

La tension f à la surface de contact de A et B.

L'équilibre subsistera lorsque, en chaque point de la courbe de raccordement des deux liquides, les trois forces F_1, F_2, f se feront équilibre.

Dans le cas où F_2 est plus grand que $F_1 + f$, la condition précédente d'équilibre ne peut jamais être satisfaite, et le liquide A s'étale à la surface du liquide B. C'est, en particulier, ce qui est réalisé par l'eau, dont la tension superficielle est 7,55, et l'huile, dont la tension est 3,5, la tension au contact des deux liquides étant d'ailleurs 2,09.

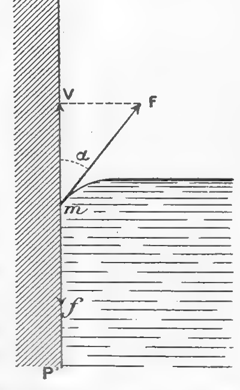


Fig. 410. — Angle de raccordement au contact d'un liquide et d'un solide non mouillé.

Angle de raccordement d'un solide et d'un liquide. — On appelle ainsi l'angle de la surface libre d'un liquide et de la surface du solide avec lequel le liquide est en contact.

La valeur de cet angle est facile à calculer en fonction de la tension propre F du liquide, et de la tension f au contact solide-liquide.

Soit, en effet, un solide PP' (fig. 410) plongé dans un liquide que nous supposerons d'abord ne pas le mouiller.

La molécule m, à partir de laquelle cesse le contact, est soumise à deux forces : F tension propre du liquide, et f tension au contact solide-liquide. La molécule m, dont nous négligerons le poids, sera en équilibre lorsque la composante de F suivant PP′ sera égale à f. Par suite, en appelant α l'angle PmF de raccordement, la condition d'équilibre sera :

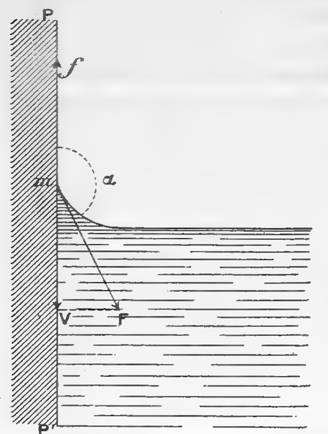


Fig. 411. — Angle de raccordement au contact d'un liquide et d'un solide mouillé.

$$F \cos \alpha = f,$$

d'où

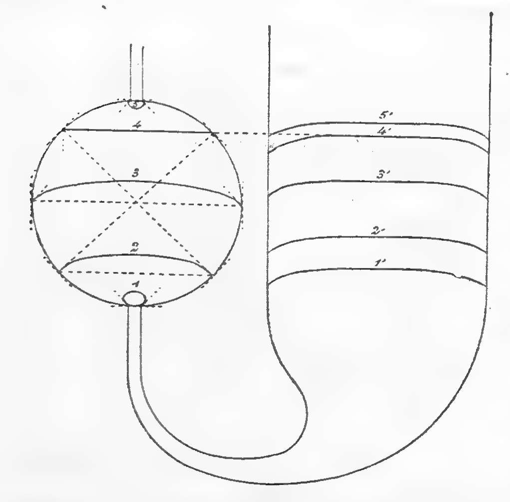
$$\cos \alpha = \frac{f}{F}.$$

La condition que la composante F *cos* α fasse équilibre à f entraîne, en outre, ainsi que le montre la figure, cette autre condition : $\alpha < 90°$.

Si le liquide mouille le solide, nous avons vu que la tension f au contact est négative et tend à étaler le liquide. Par suite, la molécule m (fig. 411) est, dans ce cas, soumise à la tension propre F du liquide et à la tension au contact f, qui est alors dirigée comme l'indique la figure. En appelant comme ci-dessus α l'angle PmF de raccordement, la condition d'équilibre est encore :

$$F \cos \alpha = f,$$

d'où l'on tire pour α la même valeur que plus haut. Toutefois, la figure montre, en raison de la direction actuelle de f, que l'angle α doit dans ce cas être obtus.


Fig. 412. — Expérience de Gay-Lussac relative à la constance de l'angle de raccordement.

Il résulte de là, que l'angle de raccordement dépend de f et de F, c'est-à-dire de la nature du solide et de celle du liquide en contact, mais que cet angle reste constant, pour les mêmes corps, quelle que soit la direction de la surface de contact.

Cette constance de α avait été depuis longtemps constatée par Gay-Lussac de la manière suivante. Un tube capillaire (fig. 412) étant réuni à une boule et à un plus large tube de verre, on verse lentement du mercure dans ce dernier. A mesure que le liquide s'élève dans la boule, sa

surface libre, au voisinage des parois, est d'abord convexe (fig. 412, 1, 2, 3), puis plane (4), et enfin concave (5), de manière que l'angle de raccordement mercure-verre conserve une valeur constante voisine de 45 degrés.

Tubes capillaires. — Les lois de l'ascension des liquides dans des tubes capillaires, c'est-à-dire d'assez faible diamètre pour qu'aucune région de la surface libre du liquide ne soit plane à l'intérieur du tube, ont été établies expérimentalement avant que la théorie des phénomènes capillaires ait été édifiée.

En partant des considérations développées dans les paragraphes précédents, on peut établir ces lois *à priori* de la manière suivante.

Soit un tube capillaire T (fig. 413) plongé dans un liquide qui ne le mouille pas, et à l'intérieur duquel la surface liquide BCD est donc convexe.

Considérons deux éléments de surface égaux, pris sur un même plan horizontal, l'un s situé à l'intérieur, l'autre s' situé à l'extérieur du tube, et assez loin de celui-ci pour que la verticale menée par s' rencontre la surface libre en une région H qui soit plane.

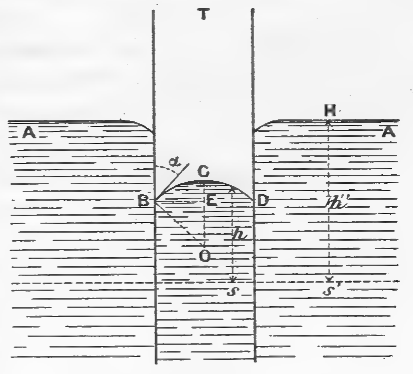


Fig. 413. — Dépression du liquide dans un tube capillaire non mouillé.

Si le liquide est en équilibre, ce que nous supposons, ces deux éléments s et s' doivent supporter la même pression. Or, l'élément s supporte la pression hd, due au poids de la colonne liquide de hauteur h et de densité d qui le surmonte, augmentée de la composante normale de la tension superficielle qui existe au niveau de la surface libre dans le tube et qui se transmet, comme toute pression, à l'intérieur du liquide.

En admettant que la surface libre BCD soit sphérique, cette composante normale a pour valeur :

$$N = \frac{2F}{R},$$

F étant la tension superficielle du liquide et R le rayon de courbure de la surface libre. La pression totale supportée en s sera donc :

$$hd + \frac{2F}{R}.$$

D'autre part, sur l'élément s', la pression, uniquement représentée par le poids de la colonne liquide qui surmonte cet élément, puisque la surface libre est plane en H, a pour valeur $h'd$, et l'on doit avoir :

$$hd + \frac{2F}{R} = h'd,$$

d'où
$$h' - h = \frac{2F}{Rd}. \qquad (1)$$

Mais, si O est le centre de courbure de la surface libre, et α l'angle de raccordement, le triangle rectangle BEO donne :

$$BE = BO \cos OBE,$$

ou
$$r = R \cos \alpha,$$

r étant le rayon du tube capillaire. L'égalité (1) peut dès lors s'écrire :

$$h' - h = \frac{2F \cos \alpha}{rd}.$$

La différence $h' - h$ des niveaux liquides à l'intérieur et à l'extérieur du tube capillaire est donc en raison inverse du rayon r du tube (loi de Jurin) ; cette différence dépend en outre de F et de α, c'est-à-dire de la nature du liquide et du solide.

Lorsque le liquide mouille le tube (fig. 414), la surface libre, à l'intérieur de celui-ci, est concave, la composante normale de la tension superficielle est alors dirigée vers l'extérieur du liquide et son effet se retranche de celui de la pression hydrostatique supportée par l'élément s, au lieu de s'ajouter à cette pression comme dans le cas précédent. La relation précédente devient alors :

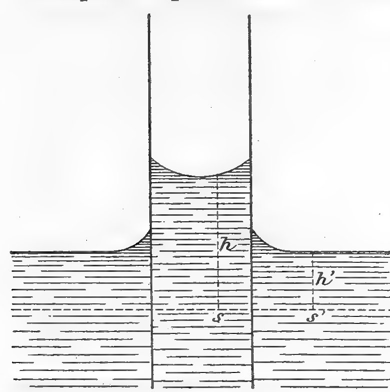


Fig. 414. — Ascension du liquide dans un tube capillaire mouillé.

$$h - h' = \frac{2F \cos \alpha}{rd}$$

d'où il résulte d'abord que h est plus grand que h', c'est-à-dire qu'il y a alors ascension du liquide dans le tube capillaire. Quant à la loi qui lie la différence des niveaux au rayon du tube (loi de Jurin), elle est la même que précédemment.

Si l'on remplace le tube par deux lames parallèles voisines, la surface libre à l'intérieur des lames peut être regardée comme cylindrique, et la composante normale, qui intervient pour régler la différence des niveaux liquides, est dans ce cas

$$N = \frac{F}{R}.$$

La différence des niveaux sera alors :

$$h - h' = \frac{F \cos \alpha}{rd}, \qquad \text{ou} \qquad h' - h = \frac{F \cos \alpha}{rd},$$

suivant que le liquide mouille ou ne mouille pas les lames, r représentant ici la demi-distance de ces lames. On voit que la différence des niveaux est alors moitié seulement de ce qu'elle serait, toutes choses égales d'ailleurs, dans un tube capillaire (loi de Laplace).

Dans la vérification expérimentale de ces lois, comme d'ailleurs dans toutes les expériences où intervient la tension superficielle, il est nécessaire de prendre de minutieuses précautions pour éviter la présence de tout corps étranger, solide, liquide ou gazeux, pouvant arriver au contact de la surface liquide libre et en modifier la tension superficielle.

Mouvements dus à la tension superficielle. — a. *Mouvements de solides.* — L'expérience montre que deux lames solides voisines, plongées dans un même liquide, se rapprochent jusqu'au contact si le liquide mouille les deux lames ou s'il ne mouille aucune d'elles, tandis que ces deux lames s'éloignent l'une de l'autre, si l'une d'elles est mouillée par le liquide tandis que l'autre n'est pas mouillée.

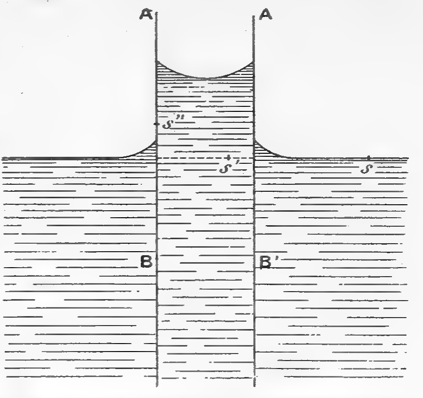


Fig. 415. — Mouvement de solides dû à la tension superficielle.

L'explication de ces mouvements est la suivante.

Soient (fig. 415) deux lames mouillées AB, A′B′. Lorsque le liquide a pris, entre les lames, la hauteur déterminée par la tension superficielle et qu'il est par suite en équilibre, deux éléments de surface s, s', pris sur le plan de la surface libre extérieure, l'un à l'extérieur, l'autre à l'intérieur des lames, supportent la même pression. Or, la pression en s se réduit à la pression atmosphérique P, tandis que la pression en s' est

$$P + Hd - N,$$

d étant la densité du liquide, H la hauteur à laquelle le liquide est soulevé entre les lames, et N la composante normale de la tension superficielle à la surface libre entre ces mêmes lames.

L'égalité

$$P = P + Hd - N \qquad (1)$$

donne

$$N = Hd.$$

Sur l'élément s'' considéré à l'intérieur et sur l'une des lames, la pression est de même

$$P + hd - N,$$

tandis qu'à l'extérieur, au même niveau, la pression est seulement P. Or, h étant plus petit que H, on a, en tenant compte de l'égalité (1) :

$$P > P + hd - N.$$

Comme il en est ainsi à tous les niveaux de la lame AB, on voit qu'en tous ces points il y a excès de pression extérieure; il en est évidemment de même pour la lame A'B', si bien que AB et A'B' se rapprochent l'une de l'autre. Ce rapprochement entraîne d'ailleurs une ascension plus grande du liquide entre les lames, une courbure plus accusée de la surface libre, et par suite une augmentation de la composante normale, d'où résulte un nouvel excès de la pression extérieure sur la pression intérieure. Aussi le déplacement des lames se produit-il jusqu'à amener celles-ci au contact.

En somme, donc, le déplacement se produit, quand les lames sont mouillées, du côté où le niveau du liquide est le plus élevé.

Un raisonnement analogue montrerait que, si les deux lames ne sont mouillées ni l'une ni l'autre, il doit de même se produire un déplacement des lames, l'une vers l'autre, jusqu'au contact. Dans ce cas (lames non mouillées), le mouvement a donc lieu vers le côté où le niveau liquide est moins élevé.

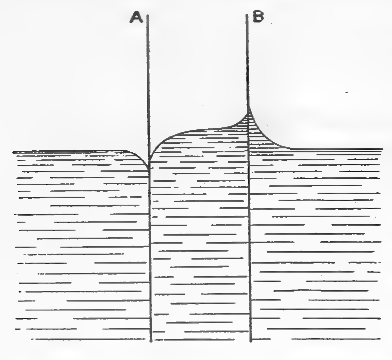
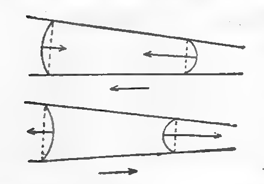


Fig. 416. — Mouvement de solides dû à la tension superficielle.

On conclut facilement de là que, si l'une des lames est mouillée et l'autre non, les deux lames s'écarteront l'une de l'autre. En effet, les niveaux relatifs du liquide, de part et d'autre de chaque lame, sont alors ceux de la figure 416; or, on voit immédiatement que la lame mouillée B doit se déplacer du côté du niveau le plus élevé, c'est-à-dire vers la droite, et la lame non mouillée A du côté du niveau liquide le moins élevé, c'est-à-dire vers la gauche.

Les considérations précédentes s'appliquent aux menus corps qui flottent à la surface d'un liquide, que celui-ci les mouille ou ne les mouille pas. Ces corps, abandonnés à eux-mêmes à la surface du liquide en équilibre, finissent, s'ils sont tous de même nature et si leurs distances primitives sont assez petites, par se rapprocher jusqu'au contact.

b. *Mouvements de liquides.* — Lorsqu'une petite quantité de liquide est introduite dans un tube conique (fig. 417), ce liquide se déplace vers le sommet ou vers la base du tube, suivant que le tube est mouillé ou non par le liquide.


Fig. 417. — Mouvement de liquides dans les tubes coniques.

En supposant que le tube soit maintenu horizontal, afin d'éliminer l'action de la pesanteur, on voit que le liquide est soumis, sur ses deux surfaces libres, à des composantes normales égales respectivement à $\frac{2F}{R}$ et $\frac{2F}{R'}$, R et R' étant les rayons de courbure des deux surfaces libres. Ces rayons sont d'ailleurs inégaux, puisque les tubes sont coniques; les composantes normales sont donc elles-mêmes inégales, et le liquide est entraîné par la plus grande de ces composantes, laquelle correspond à la courbure la plus petite.

Le liquide se déplace donc vers le sommet du tube, si celui-ci est mouillé. Lorsque le tube n'est pas mouillé, les surfaces libres sont convexes, les composantes normales changent respectivement de sens tout en conservant leurs valeurs relatives, et le déplacement a par suite lieu vers la base du tube.

APPLICATIONS DES THÉORIES PRÉCÉDENTES

Influence de la tension superficielle sur l'équilibre des aréomètres. — Dans la théorie élémentaire de ces instruments, on ne fait intervenir, pour établir la condition d'équilibre, que le poids de l'aréomètre et la poussée du liquide, tandis qu'en réalité la tension superficielle exerce, sur cet équilibre, une influence qui, lors de l'emploi d'aréomètres sensibles, à tiges fines, n'est pas négligeable.

La théorie complète de ces instruments est la suivante.

Soient p le poids de l'instrument, r le rayon de la tige supposée cylindrique, v le volume immergé dans un liquide de densité d et de tension superficielle F.

Si l'aréomètre est mouillé par le liquide, il y a lieu de considérer la tension superficielle du liquide sur toute la circonférence de la section droite de la tige le long de laquelle a lieu le raccordement du liquide et du solide en contact. Cette force est partout dirigée de haut en bas sur cette circonférence, et on peut la considérer comme verticale, ce qui revient à admettre que l'angle de raccordement est égal à 180°. L'ensemble de ces forces verticales de tension, qui tendent à immerger l'aréomètre, est égal à $2\pi r\mathrm{F}$, r étant exprimé en millimètres, et l'équation exacte d'équilibre est dès lors :

$$vd = p + 2\pi r\mathrm{F}. \qquad (1)$$

Lorsque l'instrument est ensuite plongé dans un liquide de densité d' et de tension superficielle F′, et que le volume immergé est v', l'équation du nouvel équilibre est de même :

$$v'd' = p + 2\pi r\,\mathrm{F}' \qquad (2)$$

Des équations (1) et (2) on tire :

$$\frac{v'}{v} = \frac{d}{d'} + \frac{2\pi r\,(\mathrm{F}' - \mathrm{F})}{vd'}.$$

Les volumes immergés v et v' ne sont donc en raison inverse des densités des liquides, comme on le suppose pour établir la graduation des aréomètres, que si le terme $\frac{2\pi r\,(\mathrm{F}' - \mathrm{F})}{vd'}$ est nul, c'est-à-dire si $\mathrm{F}' = \mathrm{F}$, ce qui n'arrive pas généralement.

Il résulte de là que les seuls aréomètres dont la graduation, établie d'après la théorie élémentaire, soit exacte, sont ceux qui sont toujours plongés dans

un même liquide (aréomètre de Nicholson, densimètre Rousseau), ou encore ceux qui, comme les alcoomètres, sont munis d'une graduation expérimentale, et ne sont ensuite immergés que dans les liquides qui ont servi à établir cette graduation.

Ajoutons que toute cause pouvant modifier, non pas la densité du liquide, mais seulement sa tension superficielle, influera sur l'équilibre de l'instrument et qu'il est dès lors nécessaire, quand on se sert d'un aréomètre, d'éviter la moindre trace de corps étranger pouvant agir sur cette tension.

D'après les expériences de Duclaux, l'influence de la tension superficielle peut modifier le chiffre des centièmes de la densité à déterminer.

Influence de la tension superficielle sur les hauteurs barométriques et manométriques. — Les tubes des baromètres et manomètres à mercure sont généralement assez étroits pour que la surface libre du liquide n'y soit plane dans aucune de ses régions; la hauteur du liquide y est donc moindre que celle qui correspond exactement à la pression à mesurer, et la valeur de cette dépression dépend de la tension superficielle du mercure, et du diamètre du tube ou de la flèche du ménisque qui termine la colonne liquide. Des formules, au moyen desquelles on peut d'ailleurs établir des tables à double entrée, permettent de calculer la dépression correspondante aux diverses valeurs que peut présenter la flèche du ménisque. Celle-ci ne devrait, semble-t-il, dépendre que du diamètre du tube; toutefois l'observation montre que l'angle de raccordement du mercure et du verre, et par suite la flèche du ménisque, n'est pas un élément rigoureusement constant, mais au contraire un élément variable avec le temps, probablement par suite d'altérations qui se produisent à la surface liquide, et qui sont dues aux actions exercées sur le mercure par les gaz avec lesquels la surface libre du liquide est en contact. De là, la nécessité d'avoir des tables qui donnent, pour un même rayon du tube, la dépression correspondante aux diverses valeurs que peut présenter la flèche du ménisque.

Utilisation de la tension superficielle comme constante physique. — La tension superficielle est une *constante physique spécifique* des corps chez lesquels il y a lieu de la considérer, au même titre que la densité par exemple; on peut l'utiliser, comme cette dernière et comme d'autres constantes spécifiques, pour l'analyse qualitative.

D'après Eötvös, Ramsay, Shields, il serait possible de déduire de la tension superficielle des liquides leur poids moléculaire et même leur température critique.

Compte-gouttes. — L'écoulement d'un liquide par gouttes, à l'extrémité d'un tube capillaire, est intéressant à plus d'un titre. Outre qu'il fournit un bon moyen de détermination de la tension superficielle des liquides, on l'emploie encore, soit pour établir certains dosages, soit pour déterminer rapidement, et aussi exactement qu'on pourrait le faire avec une bonne balance, un poids donné d'un certain nombre de substances médicamenteuses.

a. — Lorsqu'un liquide, contenu dans un tube cylindrique vertical à extrémité inférieure capillaire, tend à s'écouler et arrive au niveau de cette extrémité, il y forme d'abord un ménisque convexe, en chaque point duquel

s'exerce une composante normale égale à $\frac{2F}{R}$ par unité de surface et qui tend à s'opposer à l'écoulement. Sur chaque unité de surface de ce ménisque s'exercent en outre, normalement transmises: 1° une pression hydrostatique hd, h étant la hauteur du liquide dans le tube et d sa densité ; 2° la composante normale $\frac{2F}{R'}$, due à la courbure de la surface libre supérieure et dont l'effet se retranchera de la pression hd, si le liquide mouille le tube, comme nous le supposons. La courbure du ménisque inférieur, d'abord très faible, augmente à mesure que le liquide s'y accumule et deux cas peuvent se présenter.

Il peut se faire, en effet, que, grâce à l'accroissement de courbure du ménisque, on ait, à un moment donné :

$$\frac{2F}{R} = hd - \frac{2F}{R'},$$

auquel cas le liquide sera en équilibre et ne s'écoulera pas.

Par contre, il peut arriver que, malgré l'accroissement de courbure du ménisque, la condition précédente ne soit jamais satisfaite (fig. 418), auquel cas le ménisque grossit jusqu'à ce qu'une goutte liquide se détache ; ce fait se produit alors par suite de la rupture, provoquée par le poids p de la goutte, de la couche superficielle de tension F, et la rupture se produit en une région étranglée, de rayon r, située un peu au-dessous de l'extrémité du tube.

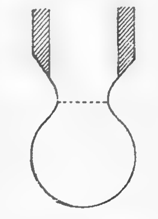


Fig. 418. — Compte-gouttes.

A ce moment, on peut écrire

$$p = 2\pi r F.$$

Si un autre liquide, de tension superficielle F′, s'écoule par le même tube, le poids p' de chaque goutte sera encore donné par l'égalité :

$$p' = 2\pi r F',$$

dans laquelle r aura la même valeur que dans le premier cas, si le second liquide mouille également le tube. L'observation montre en effet que le poids d'une goutte d'un liquide, qui mouille le tube à travers lequel il s'écoule, est indépendant de la nature du tube et dépend seulement de son diamètre. Le rayon du cercle de rupture, d'ailleurs plus petit que celui de l'ouverture du tube, doit dès lors être réglé par le rayon de cette ouverture et être indépendant de la nature des liquides.

Des égalités précédentes on tire :

$$\frac{p}{p'} = \frac{F}{F'},$$

relation qui fournit, si l'on fait écouler deux liquides par gouttes à travers un

même tube, un moyen de déterminer les valeurs relatives des tensions superficielles de ces liquides.

b. — Tate a constaté que, lorsqu'un même liquide s'écoule par gouttes à travers des tubes de divers diamètres, le poids de chaque goutte est constant pour un même tube, et d'ailleurs proportionnel au rayon de l'orifice d'écoulement.

C'est cette constance du poids des gouttes que l'on utilise quand on se sert du compte-gouttes aux lieu et place d'une balance. Si l'on a, en effet, déterminé, par des pesées préalables, le poids d'une goutte de divers liquides lorsqu'ils s'écoulent à travers une ouverture déterminée, on peut ensuite connaître le nombre des gouttes à faire écouler par la même ouverture pour obtenir tel poids que l'on désire de l'un de ces liquides. On se sert habituellement d'un compte-gouttes dont l'ouverture est telle que le poids d'une goutte d'eau distillée, à la température de 15°, est de $0^{gr},05$. Le tableau suivant donne le poids de la goutte de divers liquides d'un usage courant en médecine, ainsi que le nombre des gouttes nécessaires pour donner un poids total de 1 gramme.

Poids des gouttes à la température de 15°.

	Poids de 1 goutte	Nombres de gouttes pour 1 gr.
Acide acétique cristallisable (d. 1.0635)	0.0181	55
— azotique officinal (d. 1.390)	0.0434	23
— — alcoolisé (alcool nitrique)	0.0185	54
— chlorhydrique officinal (d. 1.170)	0.0476	21
— cyanhydrique médicinal au 1/100	0.0500	20
— phénique (acide 1 p. alcool à 90° 1 p.)	0.0200	50
— sulfurique officinal (d. 1.842)	0.0384	26
— sulfurique dilué au 1/100	0.0500	20
— sulfurique alcoolisé (eau de Rabel)	0.0185	54
Alcool à 90° (d. 0.8339)	0.0164	61
— à 80° (d. 0.8638)	0.0178	56
— à 60° (d. 0.9133)	0.0192	52
Alcoolature d'aconit (feuilles)	0.0189	53
— — (racines)	0.0189	53
Ammoniaque liquide officinale (d. 0 925)	0.0454	22
Chloroforme (d. 1.500)	0.0178	56
Perchlorure de fer (solution officinale, d. 1.260)	0.0500	20
Créosote de hêtre (d. 1.066)	0.0232	43
Éther acétique (d. 0.914)	0.0172	58
— officinal (d. 0.720)	0.0111	90
— — alcoolisé (liqueur d'Hoffmann)	0.0139	72
Glycérine officinale (d. 1.242)	0.0400	25
Gouttes amères de Baumé	0.0189	53
— noires anglaises	0.0270	37
Huile de croton	0.0208	48
— phosphorée	0.0208	48
— volatile de menthe	0.0200	50
— de pétrole	0.0175	57
— de térébenthine (d. 0.870)	0.0285	54
Laudanum de Rousseau	0.0285	35
— de Sydenham	0.0303	33
Liqueur de Fowler au 1/100	0.0347	23
Soluté de chloral au tiers	0.0322	31
— de chlorhydrate de morphine au 1/20 et au 1/100	0.0500	20

	Poids de 1 goutte	Nombres de gouttes pour 1 gr.
Soluté d'azotate d'argent, au 1/8, au 1/4 et en parties égales	0.0500	20
— de sulfate d'atropine au 1/10 et au 1/100	0.0500	20
— de sulfate de strychnine — —	0.0500	20
— — de zinc — et saturée	0.0500	20
Teinture d'aconit (feuilles)	0.0189	53
— — (racines)	0.0189	53
— de belladone	0 0189	53
Teinture de cantharides	0.0175	57
— de castoreum	0.0175	57
— — éthérée	0.0121	82
— de colchique (bulbes)	0.0189	53
— — (semences)	0.0189	53
— de digitale	0.0189	53
— d'extrait d'opium	0.0189	53
— d'iode	0.0164	61
— de noix vomique	0.0175	57
— d'opium camphrée (élixir parégorique)	0.0192	52
— de scille	0.0189	53
— de valériane	0.0189	53
Vin de colchique (bulbes)	0.0303	33
— — (semences)	0.0303	33
— de Grenache (d. 1.028)	0.0303	33
Vinaigre, à 8 p. 100 d'acide réel	0.0384	26
— scillitique	0.0384	26

c. — Duclaux a montré que le compte-gouttes peut être employé, aux lieu et place de l'alcoomètre, pour le dosage de l'alcool contenu dans un liquide hydro-alcoolique.

L'observation montre en effet que, lorsqu'on fait écouler, à travers un compte-gouttes, un même volume de mélanges hydro-alcooliques contenant des quantités variables et connues d'alcool pur, le nombre des gouttes varie assez notablement pour qu'il soit possible de caractériser ainsi sûrement chaque mélange. Cette méthode du dosage de l'alcool présente même deux avantages sur celle de l'alcoomètre :

1° La variation du nombre des gouttes correspondant à une même variation de la proportion d'alcool est plus grande pour les mélanges faiblement alcooliques, si bien que la méthode du compte-gouttes présente son maximum de sensibilité dans le cas de mélanges pour lesquels l'alcoomètre est au contraire le moins sensible.

2° Pour le cas particulier du dosage de l'alcool dans un vin, les matières, autres que l'alcool et d'ailleurs solides ou liquides, contenues dans le vin n'ont pas d'influence appréciable sur la tension superficielle de ce liquide, tandis qu'elles influent d'une façon appréciable sur sa densité. Il en résulte que, si la distillation préalable est nécessaire pour le dosage par l'alcoomètre de l'alcool contenu dans un vin, ce même dosage peut être effectué directement sur le vin lui-même quand on se sert du compte-gouttes.

Corps pesants flottant à la surface des liquides. — Un mince fil d'acier préalablement graissé et déposé sur l'eau reste à la surface, bien que la densité du métal soit très supérieure à celle du liquide, qui d'ailleurs se creuse en une sorte de lit autour du fil métallique (fig. 419). La suspension

du métal est alors due aux composantes normales de la tension superficielle du liquide, composantes qui sont engendrées par la courbure de la surface et qui donnent une résultante égale et directement opposée au poids du fragment de métal.

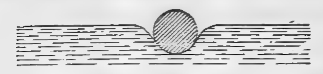


Fig. 419. — Fil métallique flottant à la surface d'un liquide.

La même cause intervient pour maintenir flottant à la surface de l'eau certains animaux dont le poids est cependant supérieur au poids d'un volume d'eau égal au leur (fig. 420). Les parties du corps de ces animaux en contact avec la surface liquide sont en effet recouvertes d'une substance grasse qui les empêche d'être mouillées par l'eau.

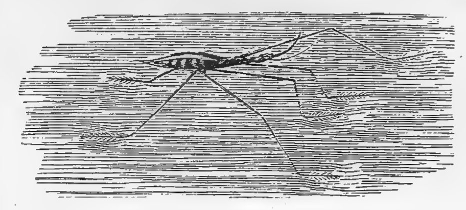


Fig. 420. — Animal flottant à la surface d'un liquide.

La larve du cousin possède, à l'extrémité de son tube à air, un organe qu'elle peut à volonté rendre mousse, lorsqu'elle veut se maintenir à la surface de l'eau pour y respirer, ou rendre assez aigu pour percer facilement la couche liquide superficielle lorsque, après avoir respiré, elle veut s'immerger.

Théorie des émulsions. — On appelle *émulsion* la subdivision, en un très grand nombre de gouttelettes très ténues, d'un liquide dit *émulsionné* au sein d'un autre liquide appelé *émulsionnant*. Un certain nombre de médicaments sont des émulsions et, d'autre part, des émulsions se forment normalement dans l'organisme; c'est là une double raison pour que nous indiquions ici la cause du phénomène, ou mieux les conditions de sa stabilité.

On dit d'ailleurs qu'une émulsion est plus stable lorsque le liquide émulsionné met plus de temps à se réunir en masse et à se séparer du liquide émulsionnant.

Les conditions de stabilité des émulsions ont été indiquées par Duclaux (1).

Il est tout d'abord évident qu'une émulsion sera d'autant plus stable que les densités des deux liquides seront plus voisines l'une de l'autre, puisque les gouttelettes du liquide émulsionné auront moins de tendance à s'accoler et à se réunir.

L'émulsion sera de même plus stable si le liquide émulsionnant est plus visqueux et offre ainsi une résistance plus grande au déplacement des gouttelettes du liquide émulsionné. La viscosité relative d'un liquide peut d'ailleurs être mesurée par le temps que met un volume donné de ce liquide à s'écouler à travers un tube d'un diamètre déterminé.

D'autre part, les gouttelettes du liquide émulsionné, lorsqu'elles sont assez nombreuses, ne sont séparées entre elles que par des lamelles du liquide émulsionnant, et l'émulsion sera plus stable si ces lamelles sont plus persistantes. La persistance des lamelles peut d'ailleurs être appréciée en notant la durée de la mousse, ou émulsion d'air, que l'on obtient en agitant fortement, dans un flacon bouché, une certaine quantité du liquide émulsionnant.

(1) Duclaux, Sur la tension superficielle des liquides (*Annales de chimie et de physique*, 1870).

Enfin, toutes choses égales d'ailleurs, une émulsion sera encore plus stable si les gouttelettes du liquide émulsionné sont, au point de vue des actions que le liquide émulsionnant exerce sur elles, dans un état plus voisin de celui des gouttelettes de même volume que l'on peut considérer au sein d'une masse homogène du liquide émulsionnant; dans ces conditions, en effet, aucune cause n'interviendra de ce chef pour modifier l'état, la position, le groupement de ces gouttelettes. La tension superficielle étant d'ailleurs nulle à la surface des gouttelettes considérées dans une masse homogène de liquide émulsionnant, une émulsion sera d'autant plus stable qu'une tension superficielle moindre existera à la surface des gouttelettes émulsionnées, c'est-à-dire que les tensions superficielles des deux liquides seront plus voisines l'une de l'autre.

L'expérience confirme pleinement les considérations que nous venons de présenter d'après Duclaux.

En particulier, la bile et le suc pancréatique sont capables d'émulsionner les corps gras, et de semblables émulsions se produisent pendant la digestion intestinale. Les considérations précédentes conduisent d'autre part à conclure que l'émulsion par le suc pancréatique est plus stable que l'émulsion par la bile, car le premier de ces liquides donne, par agitation, une mousse persistante, tandis que le second ne mousse pas. L'utilité de ces émulsions est d'ailleurs double; d'une part, en effet, la subdivision des corps gras émulsionnés en fines gouttelettes augmente la surface de contact de ces corps avec le liquide émulsionnant, et favorise par cela même les actions chimiques; d'autre part, les corps gras émulsionnés cheminent dans les chylifères avec beaucoup plus de facilités qu'ils ne pourraient directement le faire à cause de leur viscosité.

Discontinuité des colonnes liquides capillaires. — Embolies gazeuses et liquides. — Supposons (fig. 421) qu'une bulle de gaz MN existe et rende discontinue une colonne liquide capillaire, de part et d'autre de laquelle s'exerce une même pression H, la pression atmosphérique par exemple. Il est évident que, par raison de symétrie, la courbure est la même sur les deux surfaces liquides qui limitent la bulle et que, à ces deux niveaux, s'exercent donc des composantes normales de même intensité N sur chaque unité de surface. Si le liquide mouille le tube, ce que nous avons supposé sur la figure, l'équilibre de la bulle s'exprimera par l'identité :

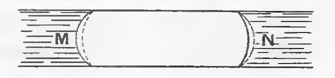


Fig. 421. — Embolie gazeuse.

$$H + N = H + N,$$

qui traduit l'égalité des pressions de part et d'autre de la bulle gazeuse.

Supposons maintenant que la pression, à la gauche de la bulle, augmente de h. Il résultera d'abord de là un aplatissement, c'est-à-dire une diminution de courbure, de la surface liquide voisine dont la composante normale diminuera de n, et une augmentation de courbure, due à l'augmentation de la pression gazeuse, de l'autre surface liquide dont la composante normale augmentera de n' ; la bulle gazeuse se déplace en outre, de telle sorte que la

pression hydrostatique, au delà de cette bulle, augmente de h'. Au moment où la bulle est de nouveau en équilibre, il devra y avoir encore égalité de pression au niveau des deux surfaces liquides qui la limitent, ce qu'exprime l'équation :

$$H + h + (N - n) = H + h' + (N + n'),$$

d'où l'on tire :

$$h' = h - (n + n').$$

La pression transmise au delà de la bulle est donc inférieure de $n + n'$ à l'accroissement de pression survenu en deçà. Il en est d'ailleurs évidemment de même au delà de la bulle suivante, s'il en existe, si bien que, lorsque le nombre des bulles gazeuses est suffisamment grand, aucun excès de pression n'est transmis à l'extrémité de la colonne liquide, qui reste donc immobile. Jamin a pu, en opérant sur un chapelet de bulles gazeuses assez long, annihiler ainsi une pression de 3 atmosphères (2 mètres de mercure ou 31 mètres d'eau).

Le même phénomène se produit encore lorsque le liquide ne mouille pas le tube capillaire dans lequel il est contenu, et il en est encore de même lorsque la discontinuité de la colonne liquide est due à la présence, non plus de bulles gazeuses, mais de bulles d'un liquide non miscible avec le premier ; dans l'un et l'autre cas, l'explication des faits est analogue à la précédente.

Des bulles, ou *embolies*, gazeuses peuvent se former, dans diverses circonstances, à l'intérieur des capillaires ; on conçoit immédiatement, d'après ce que nous venons de dire, le danger qui résulte de la discontinuité de la colonne sanguine, car l'énergie de la contraction cardiaque peut être insuffisante pour vaincre la résistance au déplacement présentée par la colonne sanguine ainsi subdivisée et pour assurer la circulation.

La formation de telles embolies gazeuses peut en particulier avoir lieu si de l'air s'introduit dans les vaisseaux, à la suite par exemple de la section d'un gros tronc veineux, ou pendant l'opération de la transfusion du sang ; aussi les constructeurs se sont-ils ingéniés à imaginer des appareils qui rendent fort difficile, sinon impossible, l'introduction de l'air pendant la transfusion.

Des embolies gazeuses peuvent de même se former lorsque l'organisme, après avoir séjourné dans une atmosphère à haute pression (scaphandrier, aérothérapie) est soumis à une décompression brusque. Les embolies sont alors dues au dégagement, dans les vaisseaux, de l'excès de gaz, dissout par le sang grâce à l'excès de pression auquel le corps a été d'abord soumis.

On peut d'autre part redouter la formation d'embolies liquides à la suite d'inhalations prolongées de chloroforme.

La résistance offerte par les chapelets capillaires a été invoquée par A. Imbert pour expliquer l'impossibilité de vider le poumon, après la mort, de l'air qu'il contient. Une transsudation liquide à travers les parois des capillaires subdiviserait alors, au niveau des dernières ramifications bronchiques, la masse gazeuse contenue dans le poumon et opposerait, à l'expulsion de l'air par la compression du poumon, la résistance habituelle des chapelets capillaires.

Drainage capillaire. — L'opération qui consiste à faire vider d'elle-même une cavité purulente en introduisant, par l'ouverture faite avec un trocart, une canule munie d'un faisceau de crins, n'est pas aseptique comme on l'a cru d'abord, c'est-à-dire n'empêche pas l'introduction de l'air ambiant dans la cavité à vider. Monoyer a fait remarquer, en effet, que, pendant ce drainage capillaire, un double courant prend naissance : l'air pénètre à l'intérieur de la cavité par quelques-uns des conduits plus ou moins irréguliers formés par la juxtaposition des crins, tandis que le pus s'écoule par les conduits analogues voisins. L'écoulement du pus, sans introduction concomitante de l'air, est tout aussi impossible, et pour la même raison, que l'écoulement d'un liquide à travers un tube étroit, à moins qu'on n'exerce sur le liquide une pression suffisante pour vaincre la résistance due à la tension superficielle.

Mécanisme de la contraction musculaire déduit de la considération des forces de tension superficielle. — L'idée de rapporter la contraction musculaire aux phénomènes de tension superficielle est due à d'Arsonval, qui l'a surtout développée en vue d'en tirer l'explication des phénomènes électriques qui se manifestent chez les animaux et qui seront étudiés dans une autre partie de cet ouvrage. D'autre part, A. Imbert (1) a poursuivi le développement de cette idée, en ce qui concerne le mécanisme de la contraction musculaire elle-même, par les considérations résumées ci-dessous. En raison d'ailleurs de leur différence de constitution, il y a lieu de considérer séparément les fibres lisses et les fibres striées.

Fibres lisses. — Ces fibres, en ce qui concerne les phénomènes de tension superficielle auxquels on va rapporter leurs changements de forme, peuvent être regardées comme constituées par une substance homogène.

La consistance de cette substance autorise la considération de forces de tension à la surface de chaque fibrille dont la forme d'équilibre, c'est-à-dire la forme que prendrait chaque fibrille si aucune résistance provenant des corps voisins ne s'y opposait, est dès lors la sphère.

Il importe de remarquer que cette forme d'équilibre, la sphère, est indépendante de la valeur absolue de la tension qui existe à la surface de la fibrille. Or l'excitation, nerveuse ou autre, qui peut agir sur la fibrille, doit être considérée, dans cette manière de concevoir le mécanisme de la contraction, comme déterminant une variation de l'intensité de la tension superficielle. Il résulte de là que la forme d'équilibre de chaque fibrille est indépendante de son état de repos ou d'excitation. Une fibrille ne pouvant d'ailleurs produire de travail extérieur, et par suite d'effet utile, qu'en se déformant, on voit que cette fibrille est incapable de produire un travail par elle-même, c'est-à-dire par la seule intervention des forces de tension qui lui sont propres.

Mais un effet extérieur utile pourra être produit si la fibrille a préalablement subi l'effet d'une force extérieure qui l'aura déformée, c'est-à-dire qui lui aura donné une forme autre que la forme sphérique. Dans ce cas, en effet,

(1) A. Imbert, Mécanisme de la contraction musculaire (*Arch. de physiol.*, 1897).

toute excitation, nerveuse ou autre, qui agira pour augmenter sa tension superficielle lui permettra de revenir plus ou moins complètement à sa forme sphérique d'équilibre, en surmontant l'obstacle qui l'avait déformée d'abord, en déplaçant par conséquent cet obstacle, c'est-à-dire en produisant un travail extérieur.

Une fibre lisse ne peut donc, d'après cela, produire de travail extérieur que si elle a été préalablement déformée par une force extérieure. Cette conclusion est en quelque sorte confirmée par les données de l'Anatomie comparée, qui montre que les fibres lisses sont toujours, partout où on les rencontre dans la série animale :

Ou situées dans les parois d'une cavité (intestin, utérus, vessie), dont le contenu exerce alors sur ces fibres l'action préalable et déformante que nous avons dit être nécessaire ;

Ou disposées en deux groupes distincts qui, en se contractant isolément, se déforment mutuellement ;

Ou associées à un ligament élastique antagoniste, chargé de déformer les fibres dont l'action est inverse de la sienne.

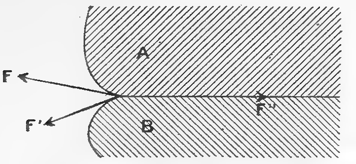


Fig. 422. — Tension superficielle dans les fibres musculaires striées.

Fibres striées. — La consistance des diverses parties dont ces fibres sont formées autorise encore la considération des forces de tension à la surface des divers disques consécutifs. Par suite, au niveau du contact de deux de ces disques A et B existent, en chaque point de la courbe de raccordement (fig. 422), trois forces qui sont :

La tension F à la surface de l'un des disques, A,
La tension F′ à la surface du disque suivant, B,
La tension F″ au contact des deux disques,

forces qui sont, en chaque point où l'on peut les considérer, normales a la courbe de raccordement.

Lorsqu'un muscle est au repos sans supporter aucune charge, ces trois forces ont des intensités telles qu'elles se font équilibre entre elles. Dans ce cas d'ailleurs, comme dans celui des fibres lisses, tout excitant, nerveux ou autre, doit agir en modifiant l'intensité relative de ces forces de tension ; celles-ci ne se font plus alors équilibre et déterminent, dans chaque disque, et par suite dans le muscle entier, des changements de forme tels que, grâce aux nouvelles directions qu'elles prennent alors, les nouvelles forces de tension F, F′, F″ se font de nouveau équilibre.

La possibilité, pour un muscle, de supporter une charge sous un certain degré de contraction est tout aussi facile à concevoir. Il suffit, en effet, que les forces F, F′, F″ aient des directions, réglées par le degré de raccourcissement, et des intensités telles que ces forces donnent, aux divers niveaux de deux disques successifs et pour les diverses fibrilles qui constituent le muscle, des composantes verticales dont l'ensemble fasse équilibre à la charge supportée.

On voit, d'après cela, que, grâce à leur constitution plus complexe, les

fibres striées sont capables de faire un travail extérieur sans qu'il soit nécessaire, comme pour les fibres lisses, qu'une force extérieure leur ait d'abord imprimé une déformation préalable.

Ranvier a d'ailleurs constaté, par l'observation directe des fibrilles musculaires qu'il faisait contracter sous le microscope, l'émission, hors des fibrilles, d'un liquide qui disparaît au moment du relâchement du muscle, phénomène qui suffit pour déterminer des changements dans les intensités des forces F, F′, F″.

Dans cette manière de concevoir le mécanisme de la contraction des muscles striés, chaque fibrille est en quelque sorte assimilable à un ressort à boudin. Il est par suite permis d'employer les mêmes termes pour caractériser les mêmes phénomènes et de dire qu'un muscle, comme un ressort à boudin, fait équilibre à une charge qu'il supporte en vertu de son *élasticité*. Mais pour rester dans la réalité des faits, il ne faut pas prendre alors ce mot avec sa signification physique habituelle, qui comprend la considération de toutes les forces moléculaires qui s'exercent entre toutes les molécules d'un corps; il faut regarder alors le mot d'élasticité comme seulement synonyme de résistance à la déformation. Ainsi se trouve justifié et précisé ce terme d'*élasticité* par lequel Chauveau a caractérisé, en principe, la contraction des muscles, en laissant volontairement de côté tout examen du mécanisme des actions moléculaires qui constituent cette contraction.

Ajoutons que de cette théorie, sans doute encore schématique, A. Imbert a pu déduire, *à priori*, les lois qui lient les variations de la force élastique musculaire au degré de raccourcissement et à la charge, lois que Chauveau a établies expérimentalement, au cours de ses recherches sur le travail musculaire et l'énergie que ce travail représente (1).

(1) Chauveau, *Le travail musculaire et l'énergie qu'il représente*, 1 vol. Paris, 1891.

SOLUBILITÉ DES SOLIDES. — IMBIBITION

Par M. A. IMBERT

Solubilité des solides. — Les actions moléculaires qui s'exercent au contact d'un liquide et d'un solide peuvent avoir pour résultat la désagrégation de ce dernier, qui disparaît en quelque sorte au sein de la masse liquide par dissémination de ses parties constituantes.

On dit alors qu'il y a *dissolution* ou *solution* du solide dans le liquide, auquel on donne le nom de *dissolvant* ou de *solvant*.

La possibilité de la dissolution dépend, d'une manière générale, de la nature du solide et du liquide en présence.

La seule définition élémentaire, que nous venons de donner, de ce phénomène, en fait immédiatement comprendre l'importance dans l'étude d'une nombreuse catégorie de phénomènes biologiques. C'est seulement, en effet, à l'état de solution que les corps, solides à la température où ces phénomènes se produisent, peuvent arriver dans l'intimité des tissus vivants, emportés au sein du solvant qui pénètre lui-même dans ces tissus grâce à l'osmose, dont il sera question plus loin. C'est, en particulier, à l'état de solution que l'on administre les médicaments solides, dont l'absorption est ainsi facilitée, en même temps que l'on peut faire varier, presque à volonté, le volume total de l'agent médicamenteux, en modifiant ce que nous appellerons bientôt le *degré de concentration* de la solution.

D'autre part, le phénomène de la dissolution a pris, dans ces dernières années, une importance théorique assez considérable, car on a dû lui accorder une place marquée à côté d'autres phénomènes dont l'ensemble constitue, à l'heure actuelle, sinon une nouvelle science, du moins une branche nouvelle établissant des liens directs chaque jour plus nombreux entre la Physique et la Chimie. C'est ainsi que l'étude des solutions peut fournir des indications sur le poids moléculaire, l'état de polymérisation, etc., des substances dissoutes. Mais c'est là un côté du phénomène dont nous avons moins spécialement à nous occuper, car il en sera plus particulièrement question plus loin, à propos de la *pression osmotique* et de la *cryoscopie*. Nous considérerons donc ici la dissolution seulement au point de vue physique.

a. A une même température, un volume donné d'un liquide déterminé ne peut dissoudre qu'un poids maximum d'un solide également déterminé, et ce

poids, toutes choses égales d'ailleurs, varie avec la nature du solide et du liquide en présence.

Un liquide qui a ainsi dissous le poids maximum d'un solide est dit *saturé*.

On appelle, d'autre part, *coefficient de solubilité* d'un solide, par rapport à un liquide, le *poids maximum* de ce solide que l'*unité de volume* du liquide peut dissoudre. Comme, d'ailleurs, il y a évidemment proportionnalité entre le volume du liquide et le poids maximum total de solide qui peut être dissous, le coefficient de solubilité peut être défini le rapport, constant pour une même température, qui existe entre le poids maximum de solide pouvant être dissous et le volume correspondant du liquide dissolvant.

Lorsqu'une dissolution n'est pas saturée, on appelle *degré de concentration* ou simplement *concentration* de cette solution le poids du solide dissous dans l'unité de volume du liquide, ou, ce qui revient au même, le rapport entre le poids total du solide dissous et le volume total du liquide.

b. Le coefficient de solubilité dépend non seulement de la nature du solide et du liquide en présence, c'est-à-dire de l'édifice moléculaire du solide et du solvant, mais encore du mode de groupement et du nombre des atomes qui constituent la molécule. Les graisses, par exemple, sont solubles dans la benzine, tandis qu'elles sont insolubles dans l'eau; d'autre part, le phosphore ordinaire se dissout dans le sulfure de carbone, tandis que le phosphore rouge est insoluble dans ce même liquide.

c. Le coefficient de solubilité d'un solide dans un liquide varie avec la température à laquelle se fait la dissolution; en représentant ces variations par une courbe, on obtient la *courbe de solubilité* du solide.

La solubilité augmente, en général, avec la température, mais sans qu'il y ait proportionnalité. Pour quelques corps, il existe un maximum de solubilité pour une certaine température; cette particularité paraît d'ailleurs tenir à ce que le solide se transforme, pour la température du maximum de solubilité, en un nouveau corps moins soluble que le premier.

d. La densité de la solution est tantôt supérieure, tantôt inférieure à celle du solvant.

e. Le volume de la solution est, en général, inférieur à la somme des volumes du solide dissous et du liquide solvant. Comme d'ailleurs il est difficile d'admettre que c'est sur le volume du solide que porte cette diminution, il est à croire que cette contraction résulte des actions moléculaires que le solide exerce sur le solvant, dont le volume serait dès lors réduit.

Cette contraction de volume des solutions paraît tout d'abord éminemment irrégulière, c'est-à-dire variable suivant la nature des corps en présence, si on la rapporte à l'unité de volume du solvant; mais il n'en est plus de même si on la rapporte au volume moléculaire du corps dissous.

On appelle d'ailleurs *volume moléculaire* d'un corps, le volume d'un nombre de grammes égal au poids moléculaire de ce corps. Si donc un corps a un poids moléculaire M et une densité D, une quantité de ce corps d'un poids égal à M grammes aura un volume $\frac{M}{D}$ qui sera le *volume moléculaire* du corps.

Soient dès lors M grammes de ce même corps dissous dans un poids P d'eau, et donnant ainsi une solution de densité d, tandis que la densité de l'eau à la même température est δ. Si la dissolution avait lieu sans contraction de volume, le volume du corps dissous, considéré dans la solution, serait évidemment égal au volume total de celle-ci $\frac{M+P}{d}$ diminué du volume de l'eau $\frac{P}{\delta}$. Le volume moléculaire du corps, calculé en considérant celui-ci dans la solution, serait donc :

$$v = \frac{M+P}{d} - \frac{P}{\delta}$$

et ce volume devrait être égal au volume moléculaire $\frac{M}{D}$ calculé directement. Or, il n'en est rien à cause de la contraction de volume qui accompagne la dissolution. Mais, en opérant sur des substances non susceptibles de polymérisation, Traube a constaté que la différence

$$\left(\frac{M+P}{d} - \frac{P}{\delta}\right) - \frac{M}{D}$$

est sensiblement constante et égale à 13,5.

f. Toutes choses égales d'ailleurs, la solubilité d'un corps solide, dans un liquide qui renferme déjà un autre solide en dissolution, dépend de la nature de ce dernier. La variation de la solubilité dans ces conditions se conçoit d'ailleurs, si l'on remarque que le liquide peut alors être regardé comme un solvant d'une nature particulière et variable avec la nature du solide déjà dissous.

g. La rapidité avec laquelle s'opère la solution d'un solide dans un liquide varie avec diverses circonstances ; elle augmente lorsque la surface du contact solide-liquide augmente, ce qui justifie la pulvérisation préalable que l'on fait généralement subir au solide que l'on veut dissoudre. D'autre part, le solide se dissout d'autant plus vite que le liquide est plus loin d'être saturé, ce qui explique l'avantage qu'il y a à agiter le solvant, de manière à renouveler constamment les couches liquides qui, en contact avec le solide, arriveraient bientôt à saturation. Dans le cas où la solution est plus dense que le solvant, on peut se contenter, pour obtenir le renouvellement de ces couches, de placer le solide à la partie supérieure de la masse liquide du solvant.

Une augmentation de température favorise de même la dissolution, dans le cas où la solubilité du solide augmente avec la température.

h. La température d'ébullition d'une solution est toujours supérieure à celle du solvant ; elle est en outre d'autant plus élevée que la proportion du corps dissous est plus considérable, fait que l'on utilise fréquemment pour réaliser une température de bain-marie supérieure à celle de l'eau bouillante.

L'élévation de la température d'ébullition correspondant à un poids de solide dissous égal au poids moléculaire de ce corps est indépendante de la nature de la substance dissoute, mais varie avec la nature du solvant. Il en résulte que, pour un même poids en grammes de substance solide dissoute

dans un même volume d'un même solvant, l'élévation de la température d'ébullition est en raison inverse du poids moléculaire du solide contenu dans la solution.

Il en est de même, d'une manière générale, du point de congélation, dont l'abaissement, rapporté à un poids de solide dissous égal au poids moléculaire de ce corps, ne dépend encore que de la nature du solvant.

L'un ou l'autre de ces faits d'observations peut être utilisé pour la détermination du poids moléculaire. En pratique, c'est surtout l'abaissement du point de congélation qui est utilisé à cet effet. Cette méthode de détermination du poids moléculaire, qui a reçu le nom de *cryoscopie* et qui est due à Raoult, est étudiée dans un autre chapitre.

k. La dissolution d'un solide au sein d'un liquide nécessite un travail de désagrégation qui ne peut être effectué que par une absorption correspondante de chaleur. Aussi la température de la solution s'abaisse-t-elle, si l'on abandonne le solvant à lui-même pendant que la dissolution s'opère, sans lui communiquer de la chaleur.

L'abaissement de la température peut être assez considérable pour être utilisé pratiquement, par exemple pour obtenir le refroidissement ou la congélation de certains liquides. La solution porte alors le nom de *mélange réfrigérant*. Les mélanges réfrigérants les plus usités sont les suivants :

	Abaissement de température :
2 parties de neige et 1 partie de sel marin................	20°
Parties égales d'eau et d'azotate d'ammonium..............	25°
5 parties d'acide chlorhydrique et 8 parties de sulfate de soude.	28°

Quant à la température finale du mélange, elle dépend évidemment des températures initiales des corps mélangés.

Quelquefois, le phénomène se complique d'une combinaison entre le solide dissous et le solvant, ce qui entraîne un dégagement de chaleur. Le résultat final est alors un abaissement ou une élévation de température, suivant l'importance relative, à ce point de vue, des deux phénomènes simultanés : dissolution et combinaison. On sait, par exemple, que la dissolution de 5 parties de neige ou de glace dans 1 partie d'acide sulfurique détermine un abaissement notable de température, tandis que la température s'élève si l'on fait dissoudre 1 partie de neige dans 5 parties d'acide sulfurique.

l. Si l'on abaisse progressivement la température d'une solution contenant un solide dont la solubilité augmente avec la température, il arrive un moment où le solvant est saturé. Pour tout nouveau refroidissement, le liquide ne pourra plus maintenir en solution tout le solide dissout, et une partie de celui-ci repassera à l'état solide. Dans ce passage à l'état solide des molécules d'abord disséminées dans le liquide, ces molécules sont libres d'obéir aux forces qu'elles exercent mutuellement entre elles, et le solide apparaît sous la forme de cristaux, s'il est susceptible de cristalliser.

Si, d'ailleurs, la solution contient plusieurs corps différents simultanément dissous, le premier de ces corps qui se dépose est celui pour lequel le point de saturation est le plus tôt atteint, résultat qui dépend et de la pro-

portion relative des corps dissous et de leur coefficient de solubilité.

m. Lorsqu'on refroidit lentement une solution saturée, en prenant les précautions nécessaires pour que le liquide reste au repos et ne se trouve pas en contact avec un cristal, quelque minime serait-il, du corps dissous ou d'un corps isomorphe, on peut en général abaisser notablement la température sans que le corps repasse à l'état solide. On dit alors qu'il y a *sursaturation.*

A ce moment, il suffit d'un choc, d'une agitation ou plus sûrement, d'après Gernez qui a longuement étudié ce phénomène, de la projection dans le liquide d'un cristal du corps dissous ou d'un corps isomorphe, pour que la cristallisation de tout le corps solide dissous en excès s'opère rapidement. En particulier, au moyen d'une solution sursaturée de soufre dans le sulfure de carbone, Gernez a obtenu à volonté des cristaux octaédriques ou prismatiques suivant qu'il projetait dans la solution un cristal de soufre de l'un ou l'autre de ces types.

Imbibition. — On appelle *imbibition* la pénétration d'un liquide à l'intérieur d'un solide, sans qu'il y ait d'ailleurs désagrégation même partielle de celui-ci.

Ce phénomène est sous la dépendance de causes encore mal connues. Une condition toutefois est nécessaire, mais non suffisante, pour que l'imbibition se produise ; il faut que le solide soit mouillé par le liquide.

En outre, et lorsqu'il s'agit de corps minéraux, l'imbibition ne se produit que si le corps présente des pores sensibles, c'est-à-dire des pores de dimensions supérieures à celles des espaces intermoléculaires qui existent dans tous les corps.

Mais il n'en est pas de même pour les corps organiques, et ceux-ci peuvent être imbibés sans présenter de solutions de continuité autres que ces espaces intermoléculaires.

Un autre caractère différencie encore, au point de vue de l'imbibition, les corps organiques des corps minéraux. Tandis, en effet, que le volume de ces derniers demeure, malgré l'imbibition, au moins à peu près invariable, les corps organiques subissent, par imbibition, un accroissement notable de volume. Il semble donc que l'imbibition a pour seul effet, chez les corps minéraux, de remplir de liquide les vides existants, tandis que les forces qui déterminent le phénomène paraissent capables, dans les corps organiques, de vaincre partiellement les effets de la cohésion.

a. La force qui détermine la pénétration d'un liquide dans un corps minéral, et qui doit au moins présenter une assez grande analogie avec celle qui engendre les phénomènes capillaires, peut produire des effets considérables, comme le montre l'expérience suivante due à Jamin. On plonge dans un liquide, capable de l'imbiber, un bloc de substance poreuse au centre duquel on a creusé une cavité en communication avec un manomètre, et l'on constate, au bout de quelques jours, qu'une pression, qui peut atteindre trois ou quatre atmosphères, existe dans la cavité, à l'intérieur de laquelle le liquide a progressivement chassé l'air des pores en prenant sa place.

Les pierres dites *gélives* sont des pierres susceptibles d'être imbibées par l'eau de pluie ; s'il survient, après l'imbibition, un refroidissement suffisant

pour déterminer la congélation de l'eau imbibée, l'augmentation de volume qui accompagne cette congélation engendre une force assez grande pour briser la pierre.

b. L'imbibition des corps organiques, en particulier des tissus organisés, a été l'objet de très nombreux travaux, sans que des lois générales aient pu être dégagées de l'ensemble de ces recherches.

Comme pour les corps minéraux, l'imbibition des corps organiques dépend de la nature des corps en présence. Quand il y a imbibition, la quantité de liquide absorbée peut être considérable; c'est ainsi que 4 parties de vessie de porc desséchée peuvent absorber, en vingt-quatre heures, plus de 35 parties d'eau.

L'imbibition, et par suite l'augmentation de volume qui en résulte, se fait d'ailleurs lentement, et ce fait est utilisé en médecine pour déterminer, à l'aide de laminaire ou d'éponges préparées, la dilatation lente et progressive d'orifices rétrécis.

Cette augmentation de volume se fait, d'autre part, sous l'influence d'une force considérable. On sait, en effet, que les Égyptiens, pour exploiter une carrière, creusaient des rigoles dans la masse rocheuse et y enfonçaient des pièces de bois sec qu'ils mouillaient et qui, en augmentant de volume par imbibition, agissaient assez puissamment pour détacher des blocs.

c. Quelle que soit la nature du corps et du liquide en présence, l'imbibition n'est pas indéfinie, et il arrive un moment où le solide est saturé.

d. Les membranes organiques absorbent en général une plus grande quantité d'eau pure que d'eau contenant un sel en dissolution, et, dans ce dernier cas, la quantité de liquide absorbé diminue quand la concentration augmente (Chevreuil, Liebig, Cloetta). Si l'on exprime alors par compression la membrane imbibée, on peut s'assurer, comme l'ont fait Brucke et Cloetta, que le liquide d'imbibition est moins concentré que la solution elle-même. Ce fait explique le dépôt de cristaux que Ludwig a constaté en plongeant un morceau de vessie de porc desséchée dans une solution concentrée de sel marin.

e. Si l'on plonge un solide dans un mélange de deux liquides, l'imbibition peut porter exclusivement sur l'un des deux liquides, ou sur les deux à la fois; dans ce dernier cas, l'absorption relative de chacun d'eux est en rapport avec l'intensité de l'imbibition directe obtenue avec chacun des liquides considéré isolément.

FILTRATION

Par M. GARIEL

I

1. — La filtration est, d'après Littré, l'opération qui consiste à passer un liquide à travers un filtre pour le débarrasser des parties solides qui en troublent la transparence et qui sont trop légères pour se précipiter.

Avant d'aborder la question même de la filtration, il nous paraît nécessaire d'insister sur quelques points auxquels il est fait allusion dans cette définition.

Lorsqu'un corps solide réduit en poudre, en poussière plus ou moins fine, est projeté dans un liquide, deux cas différents peuvent se présenter :

Si le solide est soluble, les particules disparaîtront progressivement lorsqu'elles arriveront au contact du liquide, d'autant plus vite que la solubilité sera plus grande et que les fragments seront de plus faibles dimensions. Souvent, après la dissolution, le liquide n'aura pas changé d'apparence : il restera incolore s'il l'était auparavant, ou conservera la couleur qu'il possédait s'il était coloré ; quelquefois, au contraire, la dissolution aura pour effet de donner au liquide une certaine coloration ou de modifier celle qu'il possédait. Mais, dans tous les cas, il ne subsistera pas trace du solide.

Au contraire, les particules solides subsisteront sans modification si le corps est insoluble dans le liquide; s'il est moins dense que celui-ci, il restera à la surface où il formera une couche plus ou moins épaisse ; s'il est plus dense, il pénétrera dans le liquide (il arrive quelquefois que, même dans ce cas, il reste à la surface, par suite principalement de l'air qui est emprisonné entre les particules; mais, par une agitation convenable, on fait disparaître cet état particulier). Il devrait alors, d'après les lois de l'hydrostatique, continuer à descendre, à tomber, quoique un peu plus lentement que dans l'air, de manière à se réunir au fond du vase (1).

En réalité, il n'en est pas ainsi, parce qu'il intervient une action autre que celle de la pesanteur: c'est la résistance opposée par le liquide au mouve-

(1) On démontre qu'il doit, en effet, tomber d'un mouvement uniformément accéléré dont l'accélération est égale à $g\frac{D-d}{D}$, g étant l'accélération en chute libre $9^m,88$, D la densité du solide, d celle du liquide.

ment des corps qui y sont plongés. Cette résistance, qui dépend notamment de la grandeur de la surface du corps, est faible par rapport au poids de celui-ci lorsqu'il s'agit de fragments d'assez grandes dimensions ; mais, tout en diminuant en valeur absolue, elle devient relativement de plus en plus grande par rapport au poids, au fur et à mesure que les fragments deviennent plus petits ; il est facile de reconnaître, en effet, que la surface totale d'un corps de poids donné augmente lorsque le corps est de plus en plus divisé.

Aussi, il arrive que si les particules solides sont très petites, elles descendent d'autant moins rapidement qu'elles sont plus petites. Il peut même sembler qu'elles restent en repos, qu'elles ne descendent pas, d'autant que la moindre agitation du liquide, le moindre courant qui y prend naissance, fait remonter les particules, et contre-balance ainsi l'action de la pesanteur qui tend à les faire descendre : on dit alors que le solide est en suspension dans le liquide.

Lorsqu'on projette un corps réduit en poudre dans un liquide, les diverses particules descendent avec des vitesses différentes, tombant d'autant plus vite qu'elles sont plus grosses. Après un certain temps, toutes celles qui ont des dimensions supérieures à celles des dernières qui ont atteint le fond du vase sont réunies en couches sur ce fond. Si donc on vient à retirer le liquide sans agiter le vase, à le *décanter*, on aura séparé les particules arrivées au fond de celles qui sont restées en suspension et qui sont plus fines. On a donc ainsi un moyen de séparation qui a été utilisé dans quelques opérations industrielles ; en répétant plusieurs fois cette décantation, on recueille des poudres de plus en plus fines.

Il peut arriver que, après un temps suffisamment long, toutes les particules ont atteint le fond : le liquide qui surnage est pur, et si on le décante avec précaution, on l'aura débarrassé des matières solides qu'il contenait.

Entre les deux cas que nous venons d'examiner, il pourrait s'en présenter un intermédiaire, celui où le solide serait un peu soluble ; dans ce cas, chaque particule se dissoudrait en partie, mais non en totalité : on aurait alors une solution limpide dans laquelle subsisteraient des particules solides qui seraient seulement de dimensions moindres que celles qu'on avait introduites. On voit qu'on retrouverait les mêmes conditions que dans le second cas précédemment examiné : il n'y a donc pas à nous arrêter à ce cas intermédiaire.

2. — Quelques liquides, liquides purs ou solutions, sont opaques ; mais, en général, ils sont transparents dans le sens vulgaire du mot, c'est-à-dire qu'ils laissent passer des radiations lumineuses : ils les laissent passer toutes s'ils sont incolores ; ils laissent passer seulement certaines d'entre elles s'ils possèdent une coloration propre. Il importe peu, d'ailleurs, pour la question qui nous occupe, et nous ne parlerons que des radiations qui ne sont pas arrêtées.

Les radiations qui traversent un liquide subissent toujours une certaine absorption ; mais celle-ci peut être négligée tant que la couche du liquide n'atteint pas une grande épaisseur. Ainsi, par exemple, l'interposition d'une couche d'eau de plusieurs décimètres d'épaisseur n'affaiblit pas d'une manière sensible l'intensité des faisceaux lumineux qui la traversent.

Mais la présence de particules solides en suspension modifie cet effet: d'abord, souvent au moins, ces particules sont moins transparentes que le liquide même, et le faisceau lumineux qui les rencontrera et devra les traverser sera affaibli; puis, à la surface de contact du liquide et de chaque particule, il se produira une réflexion et une diffusion de la lumière qui diminuera la quantité de celle qui continuera à se propager en ligne droite. L'intensité du faisceau reçu par l'observateur sera diminuée: la transparence du liquide aura été amoindrie.

Ce seul effet se produirait si l'expérience se faisait dans une chambre noire et qu'il n'y eût pas d'autre lumière que le faisceau qui traverse le liquide; mais, en général, il n'en est pas ainsi, et de la lumière arrive sur le liquide dans toutes les directions.

Si le liquide est pur, la lumière qui arrive du côté où est placé l'observateur traverse le liquide et sort de l'autre côté, sans que l'observateur puisse être impressionné par elle; mais si le liquide contient des particules solides en suspension, une partie seulement de cette lumière traversera, et une autre partie, réfléchie ou diffusée, revenant dans une direction opposée, arrivera à l'œil de l'observateur auquel elle fait éprouver une sensation spéciale qu'on exprime en disant que le liquide est *louche*, ou qu'il y a un *louche* dans le liquide. Cette sensation est plus ou moins forte suivant la quantité de matière suspendue, suivant aussi la dimension des particules.

La constatation de ce louche permet quelquefois de soupçonner la présence de particules en suspension qui ne produisent pas une diminution directement appréciable de la transparence.

3. — La filtration, dans son ensemble, consiste à mettre le liquide en contact avec un corps poreux, de manière qu'il traverse celui-ci, la partie liquide passant à travers les pores qui, si leurs dimensions sont assez petites, arrêtent les particules solides.

On peut citer des cas dans lesquels l'opération se réduit seulement à ces conditions; tel est, par exemple, le procédé employé pour purifier le phosphore fondu, au sein de l'eau naturellement: le liquide est placé dans une peau de chamois que l'on tord par-dessus de manière à former un *nouet*; puis, à l'aide d'une pince en bois, on comprime celui-ci : la compression se transmet au phosphore liquide qui passe à travers les pores de la peau, tandis que les impuretés, solides, restent dans le nouet. La sortie du liquide est la conséquence d'une action mécanique seulement.

En général, la filtration est précédée de l'imbibition par le liquide de la matière qui constitue le filtre, imbibition résultant des phénomènes capillaires qui prennent naissance par ce fait que le liquide mouille le solide.

L'imbibition ne consiste pas seulement en une pénétration du liquide dans les espaces vides, les pores des corps, comme il pénétrerait dans un vase vide : il y a une action spéciale, une sorte d'attraction du solide pour le liquide, qui est telle que la pénétration de celui-ci a lieu même malgré l'existence d'une pression qui s'y oppose. C'est ce qui résulte nettement de l'expérience suivante due à Jamin : Un tube de verre doublement recourbé, dont la courbure contenant du mercure fonctionnait comme manomètre à air

libre, fut scellé dans une cavité creusée dans un bloc de craie, et contenant de l'air. Le bloc fut alors plongé dans l'eau, la craie s'imbiba de liquide qui refoula l'air dans la cavité centrale où la pression augmenta : cette pression, qui atteignit trois atmosphères, était insuffisante pour empêcher l'imbibition.

4. — Lorsqu'un corps susceptible d'être imbibé par un liquide, par l'eau par exemple, est mis en contact avec ce liquide, l'imbibition se produit et, s'il y a une quantité suffisante de liquide, se continue jusqu'à ce que l'imbibition soit complète. Mais alors le mouvement de pénétration du liquide s'arrête, même s'il y a du liquide en excès, à moins que celui-ci ne soit soumis à une pression suffisante; dans ce cas, le liquide continue à pénétrer dans le solide, et vient sortir en plus ou moins grande abondance par la face opposée : on dit alors qu'il y a *transsudation* du liquide.

La pression nécessaire pour faire transsuder un liquide dépend de la nature de celui-ci, de celle du corps à travers lequel la transsudation se produit, et peut-être aussi, au moins dans certains cas, de l'épaisseur de ce dernier.

La pression nécessaire pour produire cet effet est quelquefois très faible; tel est, par exemple, le cas du papier à filtrer ordinaire : une pression de 1 centimètre d'eau, et même moins, suffit pour faire transsuder ce liquide. Liebig a déterminé la pression nécessaire pour produire le passage de l'eau à travers diverses membranes animales : il expérimenta successivement sur une vessie de bœuf, sur le péritoine qui couvrait la face supérieure d'un foie de bœuf, et sur le péritoine d'un foie de veau, ayant respectivement pour épaisseur $0^{mm},22$, $0^{mm},11$ et $0^{mm},013$, et il opéra avec des liquides différents. Voici les valeurs des colonnes de liquide qui amenèrent la transsudation :

Nature des liquides.	Vessie de bœuf.	Péritoine de bœuf.	Péritoine de veau.
Eau	$0^m,325$	$0^m,215$ à $0^m,270$	$0^m,108$
Solution saturée de NaCl	0 ,541	0 ,325 à 0 ,433	0,215 à 0,270
Huile	0 ,920	0 ,595 à 0 ,650	1,094
Alcool	»	0 ,974 à 1 ,083	»

L'alcool ne transsuda pas à travers la vessie de bœuf, même sous une pression de $1^m,310$.

Dans d'autres recherches, Cima a reconnu que l'eau transsudait à travers la peau d'une grenouille, sous une pression de $0^m,100$.

Il serait intéressant d'avoir des données précises sur la pression de transsudation à travers les substances minérales qui sont utilisées pour la construction des filtres.

Comme il est aisé de le concevoir, si on fait croître la pression du liquide à partir de la valeur pour laquelle la transsudation commence, la rapidité du passage augmente, c'est-à-dire qu'il passe plus de liquide dans un temps donné.

Cet effet paraît surtout sensible pour les membranes organisées qui subissent une distension appréciable et changent quelque peu de structure; c'est pour une raison analogue que la transsudation devient plus facile pour

ces membranes lorsqu'elles restent soumises à une pression continue pendant un certain temps.

5. — Si l'on opère non sur des liquides simples, sur l'eau, l'alcool, l'huile, mais sur des solutions de substances solides, il arrive quelquefois que ces solutions se comportent comme un liquide homogène, et transsudent sans modification de composition. Mais il n'en est pas toujours ainsi, et il peut arriver que par suite d'une action spéciale, d'une sorte d'attraction élective exercée par le solide, la solution s'est modifiée dans sa composition par son passage à travers celui-ci, sans qu'on puisse prévoir dans quel sens se produira cette modification.

C'est ainsi que Matteucci, ayant fait transsuder de l'eau salée à travers une colonne de sable de 8 mètres de longueur, observa que la densité du liquide diminuait dans le rapport de 100 à 91, ce qui prouve qu'une certaine proportion de sel était retenue par le sable. Au contraire, en opérant avec une solution de carbonate de sodium traversant une couche de sable de 3 mètres, la densité augmente dans le rapport de 100 à 100,5.

Cette action ne se continue pas indéfiniment d'ailleurs, et tout se passe comme si le solide traversé se saturait pour ainsi dire de la substance en dissolution. Dans l'expérience faite sur l'eau salée, Matteucci reconnut, en effet, que la variation de densité diminuait progressivement.

Sans insister sur d'autres faits du même genre qu'on pourrait citer, il convient de signaler d'une façon spéciale l'action du charbon, et particulièrement du noir animal. C'est ainsi qu'en faisant traverser une couche d'une certaine épaisseur de cette substance par du vin, de la teinture de tournesol, la matière colorante est arrêtée et il passe un liquide à peu près incolore. Ce corps fixe également un grand nombre de matières organiques, le tannin, divers alcaloïdes, les principes amers du houblon, de la gentiane. Il peut aussi retenir des sels minéraux en dissolution, la chaux et divers sels calcaires, des sels de plomb, etc.

Mais, dans ce cas, il ne s'agit pas d'une simple action physique, et le noir animal intervient par le phosphate de chaux qu'il contient. Nous n'avons pas à insister, puisque ces faits relèvent de la chimie; il nous a paru nécessaire de les signaler cependant.

6. — Lorsqu'un liquide qui contient des particules solides en suspension est mis au contact d'un solide qu'il peut imbiber, l'imbibition se produit sans que les particules solides y participent. C'est ce que l'on observe par exemple en étudiant l'effet produit sur du papier à filtrer ou du papier buvard par un liquide contenant des particules solides colorées, comme le chocolat : ces particules restent au point où le contact s'est produit, et constituent une tache colorée, tandis que le liquide s'étale sous forme d'une zone incolore sur une étendue plus ou moins considérable suivant la quantité de liquide.

Un effet analogue se manifeste dans les épanchements de sang dans le tissu cellulaire : le sérum se porte seul sur les bords, la matière colorante solide reste au centre.

Lorsqu'on fait transsuder un liquide contenant en suspension des parti-

cules solides, le phénomène commençant par l'imbibition, on voit que les particules solides ne passent pas et restent à la surface par laquelle pénètre le liquide; par l'autre face le liquide s'est donc débarrassé des particules en suspension, il est limpide.

C'est cette opération qui constitue la *filtration*.

On conçoit aisément que les particules solides soient complètement, et totalement arrêtées, si elles sont de dimensions relativement grandes, si leurs dimensions sont supérieures à celles des pores qui existent dans la substance filtrante, et par lesquels passe le liquide. La même action peut encore se produire même si les particules solides ont des dimensions moindres que celles des pores, au moins tant que le liquide n'est pas soumis à une trop forte pression et que, par conséquent, son écoulement est lent. Mais si la pression est forte, si l'écoulement est rapide, les particules solides peuvent être entraînées au moins en partie, le liquide qui passe n'est pas entièrement limpide, la filtration n'est pas complète.

On peut se rendre compte de ces faits en s'appuyant sur la manière dont se comportent les liquides dans les espaces capillaires : on sait, en effet, que si le liquide mouille la paroi, il en reste une couche adhérente à celle-ci et qui agit comme si elle en était partie constituante, si bien que, lorsque l'écoulement du liquide se produit, la quantité de liquide qui passe dépend non de la section réelle de l'espace considéré, mais de cette section diminuée de celle de la couche de liquide. L'influence de cette couche, négligeable lorsque le diamètre est notable, est grande, au contraire, lorsqu'il s'agit de très petits espaces.

C'est de même par cette section réduite que doivent passer les particules en suspension qui peuvent être ainsi arrêtées, quoique leur diamètre soit moindre que celui de l'espace existant au sein de la masse solide.

Il y a plus, et lors même qu'une particule solide serait de dimensions moindres que la section réduite par l'existence de la couche liquide, elle pourrait encore être arrêtée par l'attraction de cette couche même. Mais cette attraction peut n'être pas assez forte pour résister à l'action d'entraînement du courant liquide si celui-ci est assez rapide.

Les effets observés dans la filtration dépendent à la fois du solide en suspension et de la nature de la substance filtrante, et, suivant les cas, peuvent se manifester sous des pressions différentes. Il serait très intéressant, notamment au point de vue des applications, de savoir quelle est la pression que l'on ne doit pas dépasser dans des circonstances données, pour être assuré d'arriver à une filtration complète ; malheureusement, on n'a pas d'indications précises sur ce point.

II

En laissant de côté les filtrations qui se rapportent à des opérations industrielles, on peut étudier séparément :

La filtration dans les laboratoires ;

La filtration d'eau potable pour l'usage privé ;

La filtration d'eau potable comme service public.

Nous examinerons successivement ces trois cas qui correspondent à des conditions différentes.

7. — *Filtration dans les laboratoires.* — La filtration est une opération qui est très fréquente dans les laboratoires : la substance filtrante est un papier spécial, non collé, appelé *papier joseph* ou *papier à filtrer* : on en utilise deux espèces, un papier blanc et un papier gris.

Le papier est plié de manière à former une sorte de cône qu'on introduit dans un entonnoir en verre ; quelquefois ce cône est obtenu en pliant simplement le papier en quatre et en l'écartant de manière à laisser une seule épaisseur d'un côté et trois de l'autre ; d'autres fois le papier est plié et replié suivant seize ou trente-deux lignes rayonnant à partir du centre, de manière à former des redans sur toute l'étendue de la surface du cône. La première disposition est plus rapide à réaliser, mais la filtration s'y fait moins rapidement, d'une part parce que, pour une égale hauteur du liquide, l'étendue de la surface filtrante y est moindre, d'autre part parce que le papier s'applique trop exactement par tous ses points sur le verre qui sert de support, tandis que pour l'autre forme le contact ne se produit que par les arêtes des angles saillants des redans.

L'entonnoir est placé dans un support qui le maintient vertical, et au-dessous on place un vase destiné à recueillir le liquide filtré. En général, dans les laboratoires de physique, c'est ce dernier seul qu'il est intéressant de recueillir ; mais dans les opérations d'analyses chimiques, la substance recueillie sur le filtre a souvent seule de l'importance, et, quelquefois aussi, le liquide filtré et le précipité sont également utiles à conserver.

La rapidité de la filtration dépendant, toutes choses égales d'ailleurs, de la pression du liquide, c'est-à-dire de l'épaisseur de la couche liquide, on peut, dans une certaine mesure au moins, augmenter ou diminuer cette rapidité en faisant varier convenablement la quantité de liquide introduite dans le filtre en même temps.

Dans quelques cas, on se propose de *laver le précipité*, c'est-à-dire de le débarrasser aussi complètement que possible de toutes les matières solubles qu'il contient. Il faut alors faire passer dans le filtre une très grande quantité du liquide dissolvant, de telle sorte que l'opération est de longue durée.

On comprend qu'il y a avantage à faire arriver le liquide automatiquement ; mais il faut établir une régulation : il est bon, en effet, que le niveau se maintienne le plus haut possible pour que la filtration soit rapide ; il ne faut pas toutefois qu'il s'élève jusqu'au bord du filtre, car alors le passage du liquide se ferait par déversement et non par filtration. On satisfait aisément à cette condition en établissant au-dessus du filtre un vase de Mariotte ou un vase à écoulement intermittent : la disposition à adopter et le fonctionnement du système sont trop simples pour qu'il soit nécessaire de s'y arrêter.

Dans les filtrations effectuées en vue des analyses chimiques, la présence de matières étrangères même en très petite quantité étant un réel inconvénient, il faut employer un papier préparé spécialement dans ce but et qui

n'abandonne aucune partie à l'eau. Même dans ce cas, et à plus forte raison si on n'a pas de papier spécial, il convient, avant de s'en servir, de laver soigneusement le filtre avec de l'eau mélangée d'une petite quantité d'acide chlorhydrique, puis avec de l'eau distillée.

On peut hâter la rapidité de la filtration en employant le filtrage pneumatique : à cet effet, le vase destiné à recevoir le liquide filtré est placé sur une plaque de verre bien plane sur laquelle on dispose une cloche à deux tubulures dont les bords sont rodés de manière à s'appliquer exactement sur la lame de verre. Les tubulures sont munies de bouchons dont l'un est traversé par l'entonnoir qui est placé au-dessus du vase, et dont l'autre présente un tube muni d'un robinet; par l'intermédiaire de celui-ci, la cloche est mise en rapport avec une machine pneumatique ou, plus simplement, avec une trompe qui permet d'y raréfier l'air. La pression qui produit le passage du liquide étant la différence entre les pressions qui s'exercent sur les deux faces du filtre, se trouve augmentée dans ce cas de la valeur dont la pression a été diminuée dans la cloche : le liquide passe donc d'autant plus vite que l'air est plus raréfié.

8. — Enfin, pour certains liquides comme les sirops, on emploie pour la filtration la *chausse* ou *manche d'Hippocrate* : c'est un cône en feutre ou en drap serré que l'on suspend au-dessus d'un vase de manière que la base dirigée en haut soit maintenue ouverte. Le liquide est versé dans ce récipient dont il traverse la paroi en laissant les matières solides se déposer sur le fond. En général, une ficelle attachée au sommet passe à l'intérieur, et son extrémité est maintenue hors du liquide ; quand le filtre a fonctionné pendant un certain temps, on tire légèrement la ficelle de manière à soulever le sommet : le liquide du fond trouve alors des surfaces non couvertes de dépôt solide et passe plus facilement.

Cette ficelle sert également à retourner complètement la chausse quand l'opération est terminée, ce qui rend le nettoyage plus facile.

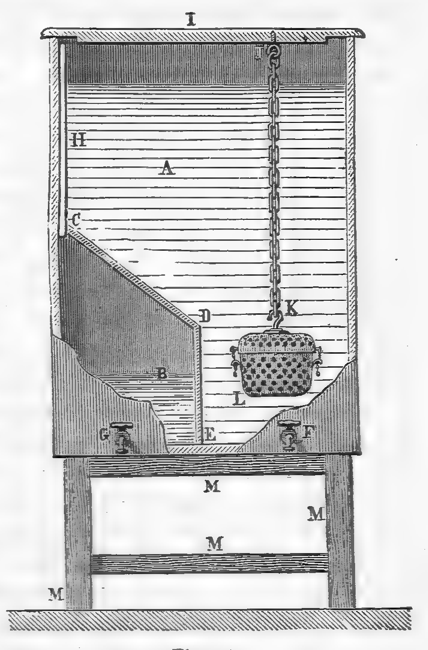


Fig. 423.

9. — *Filtration d'eau potable pour l'usage privé.* — Pendant longtemps et jusqu'à ces dernières années, le but qu'on se proposait dans la filtration de l'eau de boisson consistait à faire disparaître le *louche* que les eaux peuvent présenter et à obtenir une eau limpide : il ne s'agissait en somme que d'arrêter au passage les matières en suspension présentant des dimensions petites, mais appréciables.

Plusieurs dispositions donnent à ce point de vue des résultats favorables que fournissent divers modèles de fontaines filtrantes.

Le filtre que l'on rencontrait presque seul à Paris, autrefois, consistait en un réservoir en calcaire ou en grès de forme parallélépipédique : à l'intérieur, il était divisé en deux parties d'inégale grandeur par des plaques de pierre poreuse CDE, soigneusement cimentées entre elles et avec les parois, qui limitaient à la partie inférieure une capacité close B occupant environ la moitié de la largeur. Deux robinets F, G étaient adaptés sur la face antérieure près du fond, aboutissant l'un dans cette capacité close, l'autre en dehors.

Lorsque, la fontaine étant vide, on venait à y introduire de l'eau, ce liquide occupait immédiatement tout l'espace A en dehors de la capacité close. Puis celle-ci, lentement, par filtration, se remplissait à son tour d'eau débarrassée des matières en suspension. Suivant que l'on ouvrait l'un ou l'autre robinet, on pouvait donc avoir à volonté de l'eau venant de la cavité close, filtrée par conséquent, ou de l'eau n'ayant point traversé la plaque poreuse, non filtrée (1).

Les matières en suspension se déposaient sur la lame de pierre poreuse qui fermait la cavité à sa partie supérieure et peu à peu formaient une couche difficilement perméable qui ralentissait le passage de l'eau. On donnait généralement une direction inclinée à cette lame CD pour que les matières en suspension pussent plus facilement être entraînées vers le fond de la fontaine. Toutefois, il convenait, de temps à autre, de vider la fontaine, d'enlever le dépôt avec une brosse et de l'entraîner en projetant de l'eau qui s'écoulait par le robinet d'eau non filtrée qu'on laissait ouvert.

Un grand nombre d'appareils à filtrer présentent une disposition générale commune: l'eau pénètre dans un vase, cylindrique en général, qui est divisé en deux parties par un diaphragme poreux situé vers le milieu de sa hauteur. Les différents systèmes se distinguent par la nature de la matière poreuse employée. Celle-ci, qui est généralement comprise entre deux plaques perforées, est constituée par du sable, du charbon de bois, des éponges comprimées, de la tontisse de laine ; généralement plusieurs de ces matières sont employées simultanément, formant des couches horizontales auxquelles on superpose également d'autres couches de gravier de moyenne grosseur, de grès concassé, etc. Il est inutile de donner la description détaillée de ces divers systèmes.

Dans quelques modèles, le filtre est constitué par un vase clos présentant à la partie supérieure un orifice que l'on adapte directement à la conduite de distribution, de telle sorte que la filtration, se produisant sous pression, est plus rapide : l'eau filtrée sort par un orifice inférieur.

Dans quelques cas, la disposition est inverse : l'eau pénètre sous pression par la partie inférieure, de telle sorte que la matière filtrante est traversée

(1) La figure 423 représente une disposition signalée par M. Émile Richard pour aider à la purification de l'eau par l'action simultanée du fer et du charbon : une sorte de corbeille en fer L suspendue à une chaîne J K contient du charbon de bois. Comme il ne s'agit pas là d'une filtration à proprement parler, nous n'insistons pas.

par le liquide de bas en haut; dans ce cas, les matières en suspension peuvent moins facilement encrasser le filtre, la plus grande partie retombe sur le fond inférieur du vase et peut être évacuée par un robinet de vidange.

Dans certains modèles présentant la disposition précédente, il y a en outre une tubulure spéciale qui, partant de la conduite de distribution, aboutit à la partie supérieure du vase constituant le filtre. Pendant le fonctionnement normal, ce robinet est fermé et la tubulure n'intervient pas ; mais lorsqu'on veut nettoyer le filtre, on ouvre le robinet tandis qu'on arrête l'arrivée de l'eau à la partie inférieure. Le mouvement du liquide est renversé, et la matière filtrante est traversée de haut en bas par l'eau qui entraîne les impuretés et les rejette au dehors par le robinet de vidange. Cette disposition ingénieuse assure donc d'une manière facile le nettoyage automatique du filtre.

Depuis que les travaux de Pasteur ont fait connaître le rôle que jouent les microbes et les germes vivants, la question de la filtration, au point de vue de l'alimentation en eau potable, a complètement changé. On n'attache plus que peu d'importance aux matières minérales qui sont en suspension et qui, si elles sont désagréables, ne sont point dangereuses, de telle sorte qu'on pourrait ne pas s'en débarrasser; c'est des êtres vivants, c'est de leurs germes que vient le danger, c'est eux qu'il faut empêcher de pénétrer dans l'organisme; c'est donc eux qu'il faut arrêter au passage ; on arrête, par surcroît, les matières minérales, dont les dimensions sont plus considérables.

10. — Le filtre de M. Chamberland, dit filtre Pasteur, est celui qui paraît résoudre le mieux le problème; il repose sur l'emploi de la porcelaine poreuse, du biscuit, comme matière filtrante.

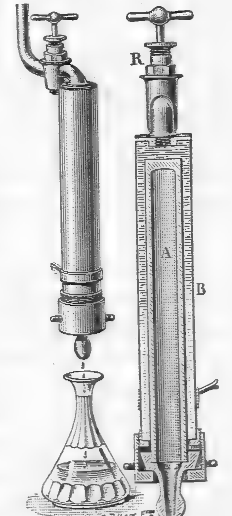


Fig. 424.

La pièce essentielle de ce filtre est un cylindre creux en biscuit A, fermé à une extrémité, se terminant à l'autre par une tubulure qui est précédée d'un collet : c'est ce qui constitue la *bougie* Chamberland. Cette bougie est introduite, le fond fermé en haut, dans un cylindre de métal B qui est relié par sa partie supérieure à la conduite de distribution par une tubulure munie d'un robinet R. A la partie inférieure, une garniture à vis vient presser le collet de la bougie contre la base inférieure du cylindre métallique, de manière à produire l'étanchéité.

Lorsqu'on ouvre le robinet supérieur, l'eau arrive sous pression dans le cylindre et baigne la surface extérieure de la bougie dans laquelle elle pénètre progressivement en traversant la paroi de dehors en dedans : toutes les matières solides sont arrêtées; seule l'eau passe, entièrement filtrée, et coule à l'intérieur de la bougie pour sortir par la tubulure inférieure au-dessous de laquelle on a placé un vase pour la recueillir.

Les matières en suspension forment une couche à la surface externe de

la bougie, couche qui s'accroît peu à peu. Il convient de l'enlever de temps à autre : à cet effet, on dévisse la garniture inférieure du cylindre, on retire la bougie, et on la lave dans de l'eau en la frottant avec une brosse. C'est là un inconvénient, car cette opération, qui doit se renouveler tous les trois ou quatre jours, est une occasion d'accidents qui peuvent arriver à la bougie : si celle-ci est cassée, il en résulte une dépense ; si elle est seulement fêlée, et qu'on ne la remplace pas, la fêlure peut laisser passer des microorganismes et le filtre ne donne plus de sécurité.

Cependant ce nettoyage est indispensable : la couche qui se dépose à la surface de la bougie constitue un milieu dans lequel les microorganismes peuvent vivre et se développer, leurs myCéliums et leurs germes peuvent passer à travers les pores de la porcelaine, et la filtration peut devenir inefficace.

Le danger est naturellement d'autant moindre que la porcelaine est moins poreuse ; mais alors la rapidité de la filtration est diminuée, ce qui est un inconvénient. Il convient donc de se défier des filtres qui sont signalés comme débitant de notables quantités d'eau dans un temps assez court, car c'est l'indication qu'ils présentent des pores relativement grands.

On a modifié la disposition de l'appareil, sans changer le principe, dans l'*aérifiltre* : l'eau pénètre directement dans la cavité de la bougie, et la filtration se fait de l'intérieur à l'extérieur. Cette disposition, en réunissant à la partie supérieure les gaz qui se dégagent, les met en contact avec l'eau sous pression et les force à se redissoudre. Mais cet avantage nous paraît largement compensé par la moindre facilité de nettoyage et d'enlèvement des matières déposées.

11. — Un autre système a été recommandé : c'est le filtre Maignien. Dans un vase en porcelaine est disposé un cône également en porcelaine et perforé, dont le sommet est dirigé en haut. On le recouvre d'une fine toile d'amiante sur laquelle on dépose avec précaution d'abord de la poudre de charbon de bois, puis du noir animal en grains de différentes grosseurs (carbocalcis). L'eau filtre à travers ces substances, et y dépose les matières qu'elle tient en suspension et, en particulier, les microorganismes ; de plus, le noir animal agit chimiquement, et arrête certains sels minéraux qui sont en dissolution dans l'eau ; dans des expériences, faciles à contrôler, on a reconnu que des sels de plomb, de zinc, de mercure étaient ainsi retenus. Mais cette action paraît s'épuiser avec le temps.

Il semble en être de même, d'ailleurs, de l'action filtrante générale, et le filtre doit être renouvelé assez fréquemment ; comme c'est une opération un peu délicate, c'est là un inconvénient, car on peut la retarder plus qu'il ne conviendrait, et alors le filtre ne produit plus aucun effet. On n'a d'ailleurs aucune indication précise du moment où l'on doit renouveler la matière filtrante.

Ce qui paraît certain, c'est que si, chez des particuliers, de semblables filtres bien soignés ont pu donner des résultats favorables, il ne semble pas en avoir été de même lorsqu'on les a employés en grand pour filtrer des quantités d'eau suffisantes pour assurer l'alimentation d'une caserne, par exemple.

12. — *Filtration d'eau potable comme service public.* — La question de la filtration de l'eau, non moins importante, est plus difficile à résoudre lorsqu'il s'agit d'assurer un service public d'alimentation d'eau.

Dans quelques circonstances, on peut avoir recours aux procédés que nous avons indiqués plus haut, en employant des appareils de grandes dimensions ou en en multipliant le nombre. On fait usage notamment des appareils fermés dans lesquels le nettoyage du filtre peut se faire par le renversement du courant liquide.

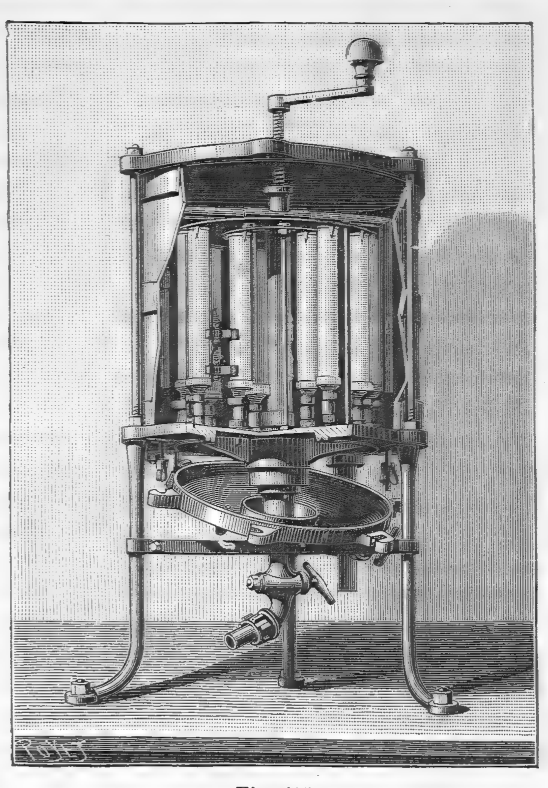


Fig. 425.

On a également employé des batteries de filtres Chamberland : le nettoyage des bougies présente d'autant plus d'inconvénients que le nombre en est plus grand. M. André a imaginé un appareil ingénieux qui permet d'opérer ce nettoyage d'une manière absolument satisfaisante, à l'aide d'une disposition mécanique, en agissant simultanément sur plusieurs bougies.

Ces divers procédés peuvent suffire pour filtrer l'eau nécessaire à l'alimentation d'une agglomération restreinte ; on ne saurait songer à les appliquer lorsqu'il s'agit de l'alimentation d'une ville.

La question ne se présente pas toujours dans les mêmes conditions.

C'est ainsi qu'on peut se proposer de filtrer l'eau d'un cours d'eau qui traverse la ville ou passe dans son voisinage. On peut alors faire usage de *galeries filtrantes*, si la nature du sol s'y prête. Nous prendrons pour exemple les galeries filtrantes qui ont été établies à Toulouse, par d'Aubuisson.

La galerie a été établie dans le banc d'alluvions sablonneuses déposé antérieurement par la rivière ; instruit par l'expérience qui avait montré que, lorsque la tranchée pratiquée reste à découvert, les eaux, limpides d'abord, ne tardent pas à se troubler, d'Aubuisson fit établir un aqueduc dont le fond était constitué par le sol de la tranchée, dont les parois latérales étaient formées par des murs en briques sans mortier, et qui était fermé à sa partie supérieure par des dalles de pierre ; la tranchée autour et au-

dessus de cet aqueduc fut remplie de graviers et recouverte au niveau du sol par une couche de terre gazonnée.

Les résultats fournis par les galeries filtrantes ont été très variables suivant les circonstances. L'opinion qui paraît maintenant être généralement adoptée, c'est que lorsque ces galeries ont fourni de bonne eau, paraissant bien filtrée, c'est que, en réalité, elles ne recevaient pas l'eau du fleuve qu'elles filtraient, mais bien l'eau d'une nappe souterraine descendant des parties voisines du fleuve. Parmi les preuves à l'appui de cette opinion, nous nous bornerons à citer ce fait que, à Toulouse, la température de l'eau des galeries filtrantes varie seulement de 8 à 9°, en hiver, à 13 à 14°, en été, alors que la température du fleuve varie dans des limites beaucoup plus étendues.

Ainsi s'expliqueraient aisément les différences signalées : les résultats seraient bons s'il y a une nappe souterraine abondante dont les eaux arrivent seules ou presque seules dans la galerie; ils seraient mauvais si ce sont les eaux du fleuve qui pénètrent dans la galerie, la filtration étant alors incomplète, insuffisante.

Le fait que les galeries filtrantes ne donnent pas de bons résultats quand elles agissent sur l'eau du fleuve suffirait à faire rejeter le projet pour la filtration des eaux de la Loire destinées à l'alimentation de la ville de Nantes. D'après ce projet, on aurait établi dans le lit du fleuve des îlots tronconiques en sable et en gravier, au centre desquels auraient été réservés des puits dans lesquels se seraient collectées les eaux ayant passé à travers les couches filtrantes. Indépendamment d'autres critiques que l'on a pu faire, on voit qu'il s'agit d'une disposition analogue comme principe à celle des galeries filtrantes, et pour laquelle les mêmes objections peuvent être faites.

13. — On peut également employer les bassins de filtration, bassins de grandes dimensions dans lesquels on fait arriver les eaux à filtrer qui ont à traverser des couches de sable et de gravier disposées méthodiquement sur le fond, sur lesquelles elles abandonnent les matières qu'elles tiennent en suspension et au-dessous desquelles elles se réunissent dans des galeries servant de collecteur; si les matières en suspension sont en grande quantité, il convient d'avoir d'abord fait reposer les eaux dans des bassins de décantation où les matières les plus grossières viennent se réunir sur le fond.

La quantité d'eau qui, dans un temps donné, passe à travers une surface de 1 mètre carré du filtre, dépend naturellement de l'épaisseur et de la composition de la couche filtrante, d'une part, et d'autre part de la pression exercée par l'eau, pression qui dépend de l'épaisseur de la couche de liquide.

La couche filtrante varie d'épaisseur, depuis $0^m,80$ (Marseille) jusqu'à 2 mètres environ (Londres, bassins de Chelsea); elle est constituée presque toujours, de bas en haut, par de gros graviers, du gravier fin, du sable et du sable fin. A Dunkerque, le sable fin repose sur des couches d'escarbilles de forge.

On fait varier l'épaisseur de la couche d'eau de manière à atteindre un

débit déterminé : on a recommandé la vitesse de $0^m,15$ à l'heure, ce qui ferait 4 mètres cubes environ par mètre carré et par jour ; mais ce chiffre est loin d'être universellement adopté ; dans certains cas, il descend à 2 mètres cubes, tandis que dans d'autres il atteint 16 mètres cubes.

D'ailleurs, un même filtre ne donne pas toujours le même débit : celui-ci, pour une même épaisseur d'eau, diminue, ou, ce qui revient au même, pour rester constant, exige une plus grande épaisseur. Cela tient à ce que les matières arrêtées par le filtre viennent s'intercaler entre les grains de sable de la couche superficielle et forment, à la surface même, une couche peu perméable. Aussi, pour ramener le débit à sa valeur primitive, faut-il nettoyer le filtre en enlevant les couches supérieures jusqu'au point où elles sont engorgées et en les remplaçant par du sable fin, préalablement lavé.

L'idée d'employer le sable pour le filtrage des eaux a été suggérée sans doute par ce qui se passe dans la filtration naturelle des eaux à travers le sol. On sait, en effet, que les eaux de source, qui ne sont en somme que des eaux superficielles ayant traversé le sol, sont très pures, et l'on a cherché à produire un effet analogue.

Mais il n'est pas difficile de voir qu'il n'y a pas véritablement analogie. Non seulement l'eau filtre à travers le sol beaucoup plus lentement qu'elle ne passe à travers les bassins filtrants, mais, de plus et surtout, pour ceux-ci, l'action est continue, tandis qu'elle est discontinue dans le sol et que, par suite, lorsque celui-ci n'est pas imbibé, il subit le contact de l'air qui n'est pas sans influence sur l'action purificatrice du sol. Enfin, le sol contient une certaine proportion d'argile dont les matières filtrantes sont dépourvues, et l'on sait que l'argile a une action sur certaines substances en dissolution dans l'eau.

On peut donc penser que si les bassins de filtration donnent de bons résultats, cela tient à ce qu'ils agissent autrement que ne le fait le sol. C'est en effet la conclusion à laquelle on paraît être arrivé maintenant, et c'est là ce que nous allons indiquer.

14. — Pour juger de la valeur d'un filtre au point de vue de l'hygiène, il n'y a qu'un moyen : c'est de faire des cultures ensemencées avec l'eau qui a traversé le filtre, et de déduire la valeur de cette eau du nombre et de la nature des colonies qui ont pris naissance.

L'expérience a montré qu'un filtre à sable neuf laisse passer les microbes ; on conçoit d'ailleurs qu'il doit en être ainsi, car les interstices qui existent entre les grains de sable ont des dimensions considérables par rapport à celles des microorganismes qui sont en suspension. Pour que ceux-ci fussent arrêtés, il faudrait donc qu'il y eût une action spéciale, une sorte d'attraction du sable sur eux : rien de semblable n'a jamais été signalé.

Mais après un certain temps, qui varie suivant les conditions de l'observation, on constate deux modifications concomitantes : l'eau passe de plus en plus claire et le nombre des microbes qu'elle contient diminue, d'une part, et, d'autre part, le débit du filtre décroît progressivement. Il semble que le filtre devienne d'autant plus efficace qu'il laisse passer moins d'eau.

Lorsque le débit est devenu trop faible, on nettoie le filtre, comme nous

l'avons dit, en enlevant la couche superficielle que l'on remplace par du sable neuf. Mais alors, on repasse par les mêmes phases que nous venons d'indiquer.

Il semble donc qu'on peut conclure de ces faits que, dans les filtres de sable, ce n'est pas le sable qui agit, mais seulement la couche qui se forme à sa surface par le dépôt progressif des matières en suspension : le filtre n'est bon que si cette couche a atteint une certaine épaisseur, mais son existence même offre au passage de l'eau un obstacle qui diminue progressivement le débit.

Cette action se comprend aisément, d'ailleurs : la couche formée par les matières déposées est constituée par des particules de petites dimensions, ne laissant entre elles, par conséquent, que des interstices de petit diamètre. Ajoutons qu'une partie de cette couche est constituée par de l'argile, dont nous avons rappelé plus haut l'action attractive spéciale.

Peut-être même peut-on donner un complément d'explication : l'observation montre que cette couche est un bon milieu de culture, car le microscope y décèle la présence de bactéries en nombre considérable, bactéries qui expliquent la consistance visqueuse de cette couche. Cette couche visqueuse qui tapisse, pour ainsi dire, les parois des pores, arrête et retient les particules solides, minérales, organiques ou organisées, qui viennent à son contact, et accroît l'efficacité du filtre.

Si cette théorie est exacte, comme il le semble, puisqu'elle est bien en concordance avec les faits, il en résulte que dans le cas où les eaux destinées à l'alimentation passent sur des filtres à sable, il convient de les étudier régulièrement au point de vue de la microbiologie : il ne faut pas utiliser, en les envoyant dans les conduites de distribution, les eaux qui sont fournies par un filtre neuf ou par un filtre récemment nettoyé ; il faut attendre que le filtre soit *formé*, ce que seule peut montrer l'analyse bactériologique.

Il est possible, d'autre part, quoique nous ne croyons pas que le fait ait été signalé, que, comme pour les bougies Chamberland, les cultures qui se développent dans la couche déposée à la surface envoient des germes ou des mycéliums qui peuvent contaminer les eaux ayant traversé le filtre. Il serait donc possible, et l'analyse bactériologique le montrerait, qu'il fût nécessaire de nettoyer le filtre, en enlevant les couches superficielles, avant même l'époque où on serait conduit à faire cette opération par suite du ralentissement du débit.

On peut parer à cet inconvénient et, à ce point de vue, retarder l'époque du nettoyage, en augmentant la pression, c'est-à-dire en augmentant l'épaisseur de la couche d'eau qui surmonte le filtre. Cet accroissement doit d'ailleurs être lent et progressif : il faut éviter toutes les actions brusques qui pourraient avoir pour effet de briser la couche argileuse déposée, ce qui, en produisant des fissures dans cette croûte, ouvrirait un libre passage aux microbes.

Comme nous l'avons indiqué, jusqu'à présent l'époque à laquelle se fait le nettoyage est déterminée seulement par le ralentissement du débit. Le temps qui s'écoule entre deux nettoyages consécutifs varie beaucoup d'un lieu à un

autre; c'est ainsi que, d'après M. Duclaux, il a été de seize jours, en moyenne, en 1888, à l'usine de Stralauer-Thor, à Berlin, tandis qu'il était de quarante-huit jours à Zurich, en 1887. Peut-être la vitesse du passage joue-t-elle un rôle : elle était de $1^{mc},1$ par jour dans le premier cas, de $4^{mc},5$ dans le second. Il paraît au moins vraisemblable que ce temps doit dépendre surtout de la quantité et de la nature des matières qui sont en suspension.

15. — Nous nous sommes étendu quelque peu sur les filtres à sable, parce que, quoiqu'ils ne fournissent pas une solution complètement satisfaisante du problème de l'alimentation en eau pure des grandes agglomérations, ils constituent cependant la seule disposition qui paraisse applicable dans ces conditions. C'est du moins ce qui résulte d'un rapport présenté par M. le Dr A.-J. Martin, à la suite d'un concours ouvert par la Ville de Paris pour l'épuration ou la stérilisation des eaux de rivière destinées à la boisson (24 juillet 1894).

Sans entrer dans l'examen complet de ce rapport, nous indiquerons les conditions qui étaient jugées nécessaires pour que le filtre fût considéré comme entièrement satisfaisant :

« L'épuration sera considérée comme parfaite si l'eau qui y a été soumise est limpide, incolore, si elle n'a aucun goût désagréable, si elle est suffisamment aérée, si elle ne contient aucun microbe pathogène et, en tous cas, qu'un très petit nombre de microbes indifférents; enfin, s'il n'y reste pas de matières organiques en quantités exagérées, et aucune substance nuisible. »

Voici maintenant celles des conclusions de ce rapport qui visent la question générale qui nous occupe :

« Le concours ouvert par la Ville de Paris témoigne une fois de plus qu'il est actuellement impossible d'obtenir par aucun filtre, grand ou petit, et d'une manière permanente, une eau comparable à l'eau de source, convenablement choisie, bien captée et suffisamment protégée.

« Le seul procédé qui paraisse actuellement applicable à la filtration en grand de tout ou partie de l'eau d'alimentation consiste dans l'épuration par le sable, avec ou sans addition de procédés d'oxydation des matières organiques à l'aide de réactifs inoffensifs, avec ou sans bassin de décantation.

« Quel que soit le procédé adopté, il doit être l'objet d'une surveillance constante, tant au point de vue de son fonctionnement technique qu'à l'égard de l'analyse chimique et de l'analyse bactériologique. »

Comme on le voit, le rapport signale la possibilité d'employer des réactifs convenablement choisis pour aider à l'épuration de l'eau : c'est là une question qui peut présenter un intérêt réel, mais dont nous n'avons pas à nous occuper, puisqu'il s'agit non plus d'applications de la physique, mais d'actions chimiques.

OSMOSE

Par M. A. DASTRE

SOMMAIRE. — **Introduction, 1-3. — Chapitre I. Étude expérimentale des phénomènes osmotiques, 4-69. — Chapitre II. Études théoriques de l'osmose, 70-91. — Chapitre III. Déterminations indirectes de la pression osmotique. Tonométrie. Cryoscopie, 92-124. — Chapitre IV. Données et applications biologiques, 124-144.**

INTRODUCTION

1. Phénomène de l'osmose. Osmomètre. Endosmose. Exosmose. — **2.** Origine de la découvert de l'osmose. — **3.** Développement chronologique et scientifique de la question de l'osmose.

1. Phénomène de l'osmose. — Osmomètre. — Endosmose. — Exosmose. — Le mot d'osmose est dérivé du grec ωσμος, *impulsion*. Il désigne un *phénomène d'impulsion* imprimée à des fluides et plus particulièrement à des liquides, un *transport* de substances. Ce transport s'exécute avec une énergie qui peut être considérable. Les expériences de l'abbé Nollet sont antérieures

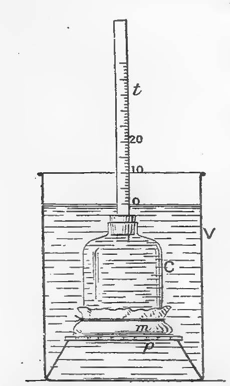


Fig. 426. — Osmomètre de Dutrochet. — C, cellule osmométrique; *m*, membrane; *p*, plaque de soutien; V, vase extérieur.

L'osmose a été découverte par H. Dutrochet en 1826 et l'étude en a été faite par ce savant, de 1826 à 1837. — La production du phénomène exige trois éléments, à savoir : deux liquides différents et une membrane ou cloison qui les sépare, — et trois conditions : les deux liquides doivent être miscibles ; ils doivent être mis en contact l'un avec l'autre par un intermédiaire, la cloison : celle-ci doit être mouillée par les deux liquides, ou au moins par l'un d'eux.

L'appareil qui réalise ces conditions constitue un *osmomètre*. L'osmomètre de Dutrochet est formé d'un flacon C dont le fond est remplacé par la membrane *m* fortement assujettie par une ligature. Le goulot est surmonté d'un tube de verre gradué. Le tout plonge dans le vase cylindrique V et y est maintenu de diverses manières. La membrane peut être supportée par une plaque *p*, percée de trous, simplement destinée à lui servir de soutien et qui n'a pas d'autre rôle que d'en empêcher la distension, la déformation de la rupture. Dans le flacon osmométrique est introduit le liquide que l'on veut

étudier, par exemple une solution de sucre ; dans le vase extérieur se trouve l'autre liquide, par exemple de l'eau pure. On s'arrange de manière qu'au début les niveaux des deux liquides coïncident, au zéro de la graduation par exemple.

L'appareil étant ainsi disposé, le phénomène d'osmose se produit.

Le niveau s'élève dans le tube central. Cette dénivellation manifeste l'existence d'un courant qui va de l'eau vers la solution sucrée, du vase extérieur vers le flacon. Mais il existe un courant inverse plus faible, moins rapide, qui entraîne le sucre dans l'eau extérieure : on peut, en effet, l'y déceler par des procédés appropriés. Il y a donc *double courant* à travers la membrane. En général, l'un d'eux prime l'autre et il le dissimulerait si l'on n'avait recours à des moyens convenables. Le phénomène apparent de la dénivellation ne traduit donc pas autre chose que la différence des effets mécaniques d'impulsion s'exerçant en sens opposés.

Les courants qui emportent l'eau du vase extérieur vers le flacon intérieur et le sucre du flacon vers le vase sont inégaux en énergie. Cette inégalité variera en grandeur selon les conditions, selon les diverses concentrations de la liqueur sucrée. Avec un choix convenable de liquides, on conçoit qu'à un moment donné elle pourra être nulle ; les deux courants seront égaux ; aucune dénivellation ne traduira leur existence. On dira alors, pour employer une expression nouvelle, que les deux liqueurs sont *isotoniques*.

Il peut donc y avoir toutes les variétés imaginables dans la force relative de ces courants. Le seul fait général, c'est, en principe, l'existence du double mouvement, des doubles courants. L'un d'eux est appelé courant d'*endosmose*, mouvement d'*endosmose*, ou simplement *endosmose* ; l'autre est appelé *exosmose*. Ces mots expriment que l'un des courants va du vase extérieur au flacon intérieur (ἔνδον, intérieur) et l'autre en sens contraire (ἐξ, dehors). Mais ils sont mal choisis ; Dutrochet lui-même l'a reconnu. Le dedans ou le dehors de l'appareil n'ont aucune signification particulière. On peut renverser la disposition des liquides, mettre l'eau dans le compartiment intérieur et le sirop de sucre dans l'extérieur ; les mouvements seront alors inversés ; le niveau baissera dans le tube gradué et le courant principal se fera cette fois du dedans au dehors, tout en allant encore de l'eau pure vers le sirop.

Pour conserver au même phénomène le même nom, on devra renoncer à la signification étymologique. C'est cette convention que fit Dutrochet. Il convint d'appeler *endosmose* le *courant principal*, le plus énergique (qu'il marche d'ailleurs du dedans au dehors ou du dehors au dedans) et *exosmose* — plus tard, *diosmose* — le courant *le plus faible*. L'effet que l'on observe immédiatement, l'élévation ou l'abaissement de niveau, indique la direction de l'endosmose : il manifeste et mesure l'excès d'énergie de ce courant sur l'autre. Si l'on se place au point de vue des forces mises en jeu dans l'osmose, c'est-à-dire, au point de vue dynamique, on n'aura affaire qu'à l'*endosmose*, qui est le *courant le plus énergique*, ou mieux l'*excès du courant le plus énergique sur le plus faible*. Au contraire, si l'on a en vue toutes les particularités du phénomène, les changements de volume, le déplacement final des substances, la composition définitive des liquides, il faudra envisager les

deux courants endosmotique et exosmotique et non plus seulement leur différence.

Membranes hémiperméables. Conditions typiques de l'osmose. — Nous verrons que l'on peut amener ces deux points de vue à se confondre. Il existe, en effet, des membranes qui sont *hémiperméables*, c'est-à-dire traversables par l'un des liquides seulement et non par l'autre ; perméables à l'eau par exemple, et absolument imperméables au sucre. Ce sont les membranes que Traube et Pfeffer ont introduites dans l'étude de l'osmose. Avec elles, il y a seulement endosmose ; le courant le plus énergique est le seul qui subsiste ; l'exosmose est nulle ; l'osmose se fait dans une seule direction. C'est là, comme on le comprend bien, une simplification très avantageuse, dont on tirera parti pour la mesure des effets osmotiques. *La condition typique de l'étude de l'osmose est donc réalisée par une solution (par exemple saline ou sucrée) et de l'eau pure, séparées par une membrane hémiperméable.*

En résumé, suivant que l'on fera usage de tels ou tels liquides ou de telle ou telle membrane, l'énergie relative des deux courants endosmotique (le plus fort) et exosmotique (le plus faible) pourra varier de l'égalité (*isotonie*) à la plus extrême inégalité (*hémiperméabilité* de la membrane, l'un des deux courants étant nul).

2. *Origine de la découverte de l'osmose.* — Dutrochet fut mis pour la première fois en présence d'un fait d'osmose en 1809, au cours de l'examen qu'il pratiquait au microscope d'une moisissure aquatique déjà observée par Needham. Celle-ci se montrait sous forme de filaments terminés par des capsules ; elle avait été recueillie sur la surface de la plaie d'un poisson vivant, mais elle pouvait végéter sur des grains de blé immergés, etc. Il vit l'eau pénétrer à travers la membrane des capsules terminales et en chasser le contenu (spores), sans pouvoir se rendre compte de la force qui était entrée en jeu. Il retrouva le même phénomène quelques années plus tard, d'une manière accidentelle, en observant dans l'eau la gaine péniale des limaces, expulsée au moment de l'accouplement ; il vit cette sorte de sac spermatique évacuer son contenu et se remplir d'eau par un mécanisme inconnu, mais que, dans son esprit, il rapprocha du précédent. Il fut amené ainsi à étudier les faits qui se passent lorsque de l'eau et un liquide plus dense sont mis en rapport à travers une membrane animale. Ce fut l'origine de son *endosmomètre* et de ses expériences sur l'osmose, dont il communiqua les premiers résultats à l'Académie des sciences dans la séance du 30 octobre 1826.

Quelques années auparavant, en 1822, un physicien allemand, Fischer (de Breslau) s'était trouvé fort près de cette découverte, qui cependant lui échappa. Il avait plongé dans une solution de sulfate de cuivre un tube fermé inférieurement par une membrane de vessie, et contenant une petite quantité d'eau où baignait un fil de fer ; il avait vu, au bout de plusieurs semaines, le liquide s'élever dans le tube au point de le remplir. Il s'agit ici d'un phénomène complexe. Dans la première phase que l'auteur n'avait pas aperçue, l'endosmose avait fait baisser le niveau de l'eau dans le tube : puis le sulfate de cuivre

ayant, inversement, passé par exosmose dans le tube, avait été réduit par le fer. Il s'était formé une solution de sulfate de fer dont la densité était allée en augmentant jusqu'au moment où put s'établir un nouveau courant endosmotique dirigé cette fois du vase extérieur vers le tube. C'est le dernier anneau de cette chaîne de faits que Fischer avait aperçu.

3. Développement chronologique et scientifique de la question de l'osmose. — Le développement de nos connaissances relativement à l'osmose s'est fait par *à-coups*, par des travaux successifs qui marquent autant d'étapes, aussi bien au point de vue chronologique qu'au point de vue scientifique. On peut en distinguer quatre. C'est d'abord l'étude empirique des faits fondamentaux par Dutrochet (1826-1837) ; 2° en second lieu, le rattachement des phénomènes de l'*osmose* à ceux de la *diffusion* par Graham et Dubrunfaut (1849-1853-1862) ; 3° la nouvelle étude expérimentale de Pfeffer (1877) et la détermination de la *pression osmotique absolue*, grâce à l'artifice des membranes hémiperméables ; 4° enfin la détermination des *pressions osmotiques relatives*, et l'étude de l'isotonie au moyen de la *plasmolyse cellulaire* par de Vries et ses imitateurs, Donders et Hamburger. Cet ensemble constitue ce que l'on peut appeler l'étude expérimentale de l'osmose — bien que les considérations spéculatives n'y aient pas été étrangères.

En 1885, avec les travaux de Van t'Hoff, l'osmose entre dans les voies de la Théorie. La question de l'osmose subit une révolution véritable. Elle est renouvelée, non par une découverte de fait, mais, si l'on peut ainsi parler, par une découverte de doctrine. La théorie de Van t'Hoff, complétée par Arrhénius, l'a amenée de la position effacée, et en quelque sorte hors cadres, qu'elle avait précédemment, à la situation tout à fait considérable qu'elle occupe maintenant dans la Physico-Chimie. En rattachant les phénomènes osmotiques à ceux de l'expansion des gaz et des vapeurs, compliqués de dissociation électrolytique, ces spéculations ont fourni de nouveaux moyens d'en aborder l'étude et d'en mesurer l'énergie. On a pu déterminer les pressions osmotiques en déterminant l'abaissement du point de congélation du liquide (cryoscopie), de sa tension de vapeur (tonométrie), de sa conductibilité électrique. Et quoique aucune découverte importante dans l'ordre des faits, aucune apparition d'un résultat inattendu ne soit venue l'illuminer, ce champ scientifique n'en a pas moins pris une très grande extension. Le grand changement qui s'y est accompli, de nos jours, porte donc surtout sur les interprétations et les applications des faits.

Les indications précédentes fournissent une division naturelle à notre étude. Nous examinerons donc successivement la partie expérimentale avec ses quatre périodes — et dans un second chapitre les développements théoriques. Dans une troisième partie, nous considérerons les applications biologiques.

CHAPITRE PREMIER

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES PHÉNOMÈNES OSMOTIQUES

SOMMAIRE. — § 1. Premières études expérimentales. Dutrochet, 4-14. — § 2. Étude des membranes osmotiques : A, cloisons naturelles; B, cloisons artificielles, 15-42. — § 3. Résultats des mesures osmotiques directes. Valeurs numériques. Lois de l'osmose, 43-51. — § 4. Méthode physiologique. Déterminaisons osmométriques comparatives de DE VRIES. Plasmolyse. Isotonie, 52-69.

---

§ I. — PREMIÈRES ÉTUDES EXPÉRIMENTALES DE L'OSMOSE

SOMMAIRE. — **4**. Conditions de l'osmose. — **5**. Direction de l'osmose : A, valeur relative des deux courants endosmotique et exosmotique ; B, pression osmotique absolue ; C, osmose relative à l'eau. — **6**. Les deux phases de l'osmose : première phase, mouvement ascensionnel. — **7**. Vitesse osmotique relative. — **8**. Pression osmotique absolue. — **9**. Résultats, influence de la concentration. — **10**. Deuxième phase : Dialyse, Diosmose. — **11**. Comparaison des liquides de composition différente : indépendance des propriétés osmotiques d'avec la densité. — **12**. Comparaison des liquides de même composition, de concentration différente. — **13**. Influence de la température. — **14**. Premières théories de l'osmose : l'osmose considérée comme propriété de membrane.

4. *Conditions de l'osmose*. — Dutrochet fixa les conditions du phénomène. — La première, c'est que les liquides soient susceptibles de se mélanger. Il n'y a pas d'osmose, si l'on met en rapport, au moyen de l'osmomètre, de l'huile et de l'eau.

En second lieu, il est nécessaire que l'un des liquides au moins soit capable de mouiller la cloison membraneuse, c'est-à-dire d'entrer en contact intime avec sa surface ; ce qui, étant donnée la constitution de celle-ci, a pour résultat d'en amener l'imbibition, c'est-à-dire la pénétration dans toute l'épaisseur.

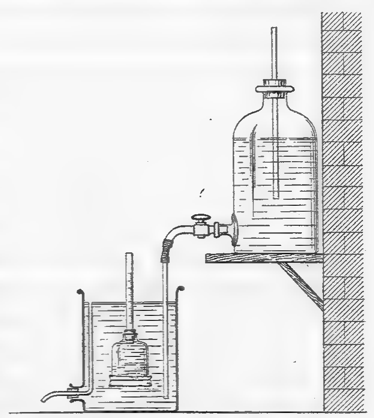
Mais ces conditions, pour *nécessaires* qu'elles soient, ne sont pas encore *suffisantes*. D'après Dutrochet, une cloison de porcelaine dégourdie (qui n'a subi qu'une première cuisson insuffisante) ne permet pas l'osmose entre des liquides qui, cependant, la mouillent et l'imbibent. Il faut une condition de plus, un certain rapport de convenance entre la cloison et l'un des liquides au moins. Dutrochet l'exprimait en disant que l'un des deux liquides devait avoir de l'*affinité* pour la substance de la cloison séparatrice. Nous verrons tout à l'heure, en étudiant le rôle des membranes osmotiques, la véritable signification de cette condition.

5. *Grandeur et direction de l'osmose*. — *a*. VALEUR RELATIVE DES DEUX COURANTS ENDOSMOTIQUE ET EXOSMOTIQUE. — Les conditions du phénomène, c'est-à-dire du double mouvement osmotique, étant réalisées, la première question qui se pose est de savoir dans quel sens il s'accomplira, c'est-à-dire *lequel des liquides sera dirigé le plus énergiquement vers l'autre*. Il y a bien des cas où cette direction des courants endosmotique et exosmotique ne peut être prévue d'avance, mais il y en a d'autres où cette prévision est possible,

par exemple lorsque l'un des liquides seulement mouille la membrane. Le mouvement endosmotique se produit alors de celui-là vers l'autre. C'est ce qui se passe, avec l'alcool et l'eau : le courant principal a lieu de l'alcool vers l'eau si la membrane n'est mouillée que par l'alcool ; au contraire, l'eau marche vers l'alcool si la membrane n'est mouillée que par l'eau.

b. Pression osmotique absolue. — Lorsque les deux liquides mouillent la cloison osmotique (lorsqu'il s'agit, par exemple, de deux solutions aqueuses) il ne semble plus si facile de discerner par avance le *sens de l'osmose.* Dutrochet a essayé de pénétrer la loi qui détermine la direction du courant principal. Il n'y est point parvenu ; il a établi, sous le nom de *loi des différences de densité*, une règle qui n'est applicable que dans des conditions restreintes et qui n'a d'ailleurs qu'une valeur approchée. La solution du problème était réservée aux études contemporaines. Celles-ci ont établi, en effet, que le courant principal avait lieu du liquide dont la *pression osmotique absolue* est la plus grande vers le liquide où elle est la plus petite. Pour une liqueur donnée, cette pression osmotique absolue est un paramètre caractéristique, une constante physique, qui se détermine directement au moyen de l'osmomètre à membrane semi-perméable, ou indirectement par des mesures de température de congélation, de tension de vapeur, de conductibilité électrique. Cette même différence des paramètres osmotiques fait connaître non seulement la direction du courant principal, mais encore l'énergie relative des deux courants qui tendent à mélanger les liquides.

c. Osmose relative a l'eau. — C'est donc là un point qui a échappé à Dutrochet et que ses successeurs ont élucidé. D'ailleurs, cet auteur avait cependant compris que la manière de se comporter, l'action réciproque de deux solutions aqueuses l'une par rapport à l'autre devait se déduire de leur manière respective de se comporter par rapport à l'eau. Et c'est ce cas plus simple de l'osmose entre l'eau et une solution aqueuse qu'il a surtout étudié. La condition de l'étude expérimentale de l'osmose est donc celle-ci : une solution aqueuse d'un côté de la membrane ; de l'eau pure de l'autre côté, au début de l'opération.


Fig. 427. — Osmose dans l'eau pure renouvelée.

Cette étude peut être simplifiée si l'on opère de manière que le liquide extérieur continue à être de l'eau pure pendant toute la durée de l'opération. Alors, à la vérité, le liquide intérieur varie de composition, puisqu'il perd toujours, par exosmose, la substance soluble ; mais le liquide extérieur reste constant. Ce résultat est obtenu pratiquement en employant un vase extérieur de très grand volume par rapport à l'osmomètre, et c'est ainsi qu'opérait Dutrochet. Mais ce n'est là qu'une assez grossière approximation. On réalise le mieux la condition en organisant un courant d'eau pure renouvelée dans le vase extérieur. Un niveau constant est établi, comme le montre la figure 427.

6. Les deux phases de l'osmose. Première phase, mouvement ascensionnel. — L'évolution du phénomène d'osmose comprend deux phases.

Dans la première phase, c'est le mouvement endosmotique qui l'emporte : dans la seconde, c'est l'exosmose. Par exemple, si l'on emploie l'eau (vase extérieur) et le sirop de sucre (vase intérieur), on verra l'eau pénétrer dans ce dernier et élever progressivement le niveau du liquide dans le tube, jusqu'à une certaine hauteur maxima. Cette ascension de la colonne liquide intérieure traduit la prédominance du courant endosmotique sur l'autre. C'est la première phase. A mesure que le niveau approche de sa hauteur maxima, la vitesse de son ascension va en diminuant. Cette *vitesse est donc variable et décroissante* du début de l'opération jusqu'au moment où le maximum est atteint.

7. Vitesse osmotique relative. — Dutrochet considérait la vitesse moyenne de ce mouvement ascensionnel, c'est-à-dire la vitesse du mouvement uniforme qui amènerait, dans le même temps, le niveau de la colonne liquide du zéro à son point maximum. En supposant le mouvement uniforme, la vitesse, espace parcouru dans l'unité de temps, s'obtiendrait en divisant l'ascension totale du niveau (nombre de divisions lues sur l'échelle) par le temps (nombre d'heures et de minutes) employé à la parcourir. On a ainsi la vitesse moyenne, ou ascension moyenne dans l'unité de temps. C'est la *vitesse osmotique* de la solution employée dans le cours de l'expérience.

Mais ici se présente une petite difficulté, car la solution employée n'est pas restée la même dans le cours de cette expérience ; par suite de l'exosmose, elle s'est constamment diluée et sa densité, à la fin, est plus petite qu'au commencement. On imagine la solution dont la densité serait intermédiaire, c'est-à-dire qui aurait, pour densité, la moyenne des densités initiale et finale. Et, en fin de compte, la *vitesse osmotique* est la vitesse d'ascension d'une *solution moyenne*, qui dans le même temps subirait la même ascension totale que la solution employée.

Cette notion, comme on le voit, est assez artificielle ; et l'on peut craindre que les déterminations numériques de ce genre n'aient pas un rapport assez étroit avec le cours réel du phénomène pour permettre d'en saisir les lois. Dutrochet, dans la pratique, essaya d'atténuer cet inconvénient. Au lieu, en effet, de considérer le phénomène total, il ne considérait que ses débuts. Au lieu d'attendre vingt-quatre ou quarante-huit heures, par exemple, jusqu'à ce que le niveau eût atteint son point culminant, il se bornait à constater ce qui se passait dans la première ou dans les deux premières heures. Il déterminait par conséquent la *vitesse moyenne dans les premiers temps* de l'opération. Et il est certain que c'est dans cette période que les différences sont les plus caractéristiques.

L'opération consistait donc à placer successivement dans l'osmomètre diverses solutions sucrées, de l'eau pure dans le vase extérieur. On partait de l'égalité des niveaux dans les deux vases. On mesurait l'ascension dans un même temps, en soixante ou quatre-vingt-dix minutes. On connaissait la

densité au début : on la déterminait au moment où l'on mettait fin à l'expérience.

Voici un exemple :

Expérience. — Avec une première solution sucrée (1 de sucre contre 4 d'eau), Dutrochet observait l'ascension au bout d'une heure et demie. Le niveau s'était élevé de 39 millimètres dans le tube gradué de son appareil.

Avec une deuxième solution (1 de sucre contre 2 d'eau), l'ascension dans le même temps avait été de 68 millimètres.

Avec une troisième solution (1 de sucre contre 1 d'eau), l'ascension dans le même temps avait été de 106 millimètres.

Les trois nombres, 39, 68, 106 représentent respectivement les vitesses osmotiques relatives dans les trois expériences.

Il est remarquable que ces déterminations de *vitesses osmotiques* dans les expériences de Dutrochet aient concordé très sensiblement avec les mesures des *pressions osmotiques*, comme nous en donnerons un exemple plus loin (n° **12**).

8. Pression osmotique. — Un autre élément qui est bien plus *adéquat* à la nature du phénomène et qui semble bien plus capable d'en permettre l'analyse, c'est ce que Dutrochet appelait la *force osmotique*. Le mouvement ascensionnel se ralentit et finit par s'arrêter. Le niveau reste stationnaire un moment, avant de redescendre lentement. A ce moment de repos, il y a donc équilibre entre l'impulsion qui tend à faire pénétrer l'eau dans l'osmomètre et la pesanteur qui résiste à la pénétration. A cet instant du maximum, la hauteur du soulèvement p mesure donc la *force*, la *pression* ou le pouvoir *osmotique*.

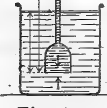
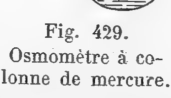


Fig. 428.

Cette force est souvent considérable. En partant d'un sirop de sucre de densité 1,3, on obtiendrait une endosmose capable de soulever une colonne correspondant à une pression de 4 atmosphères, c'est-à-dire à une colonne d'eau de plus de 40 mètres.

On comprend par cet exemple quelles pressions considérables peut développer le jeu des forces osmotiques : et, en effet, on les observe soit dans les appareils physiques, soit dans les tissus vivants, à la condition qu'il y ait des dispositions particulières qui soutiennent la membrane osmotique et lui permettent de résister à ces fortes pressions (artifice des plaques de soutien, membrane cellulaire, etc.).

L'appareil ordinaire ne suffit pas à des mesures de ce genre. Dutrochet employait une autre forme d'osmomètre (Voy. fig. 429) qui permettait d'équilibrer la pression osmotique par une colonne de mercure.


Fig. 429. Osmomètre à colonne de mercure.

La mesure de la pression osmotique, appréciée comme on vient de le dire, au moment du maximum d'ascension, est une mesure assez laborieuse. Elle exige que l'on suive le phénomène longtemps et avec grande attention. Il faut saisir le moment du maximum, et déterminer la hauteur à ce moment. Il faut aussi déterminer

la température, qui est une circonstance ayant grande influence sur le phénomène; et, enfin, la *composition du liquide de l'osmomètre au moment du maximum*. C'est, en effet, à la solution, telle qu'elle existe à ce moment, que se rapporte l'équilibre momentané et, par conséquent, la mesure de la pression osmotique.

Expérience. — Avec un sirop de sucre de densité 1,070 à l'intérieur et de l'eau pure à l'extérieur de la membrane, Dutrochet constate que le mouvement ascensionnel, dans son appareil, s'arrête au bout de trente-six heures. La colonne d'eau soulevée était équilibrée par une colonne de mercure de 617 millimètres de hauteur — et à ce moment la solution de l'osmomètre contenait exactement une partie de sucre pour sept parties d'eau (densité 1,053). La pression osmotique correspondant à la solution de sucre de densité 1,053, contenant 1 p. 7 d'eau, est donc $0^m,617$.

Avec un sirop de sucre de densité 1,140 dans le flacon osmométrique et de l'eau pure au dehors, le même auteur constate que le mouvement ascensionnel s'arrête au bout de quarante-huit heures. La colonne soulevée, en mercure, est de $1^m,283$. La densité finale du liquide intérieur est de 1,110; il contient 1 de sucre pour 3 d'eau. L'équilibre qui existe à ce moment nous montre que la *pression osmotique* correspondant à la solution sucrée de densité 1,110, contenant 1 de sucre pour 3 d'eau, a pour valeur $1^m,238$.

9. Résultats. Influence de la concentration. — Le résultat le plus général de ces recherches, c'est que, lorsque l'on opère sur une même substance, la vitesse et la pression osmotiques vont en augmentant à mesure que l'on emploie des solutions de plus en plus concentrées. Lorsque l'on opère sur des substances différentes, toute base de comparaison fait défaut. Les expériences de Dutrochet ne purent élucider ce point essentiel (Voy. n° **11**).

10. Deuxième phase. Exosmose; sa lenteur, son terme. Dialyse. — Après s'être maintenu quelque temps à sa hauteur maximum, le niveau du liquide intérieur commence à baisser lentement. Cet abaissement est dû à ce que la concentration de la solution intérieure diminue par suite de la sortie d'une petite partie de sucre entraînée par le courant exosmotique, et par suite de l'introduction de l'eau par le courant endosmotique. Ce mouvement de dénivellation et de dilution se continue avec une extrême lenteur jusqu'à ce que, enfin, la concentration soit la même dans les vases intérieur et extérieur, les niveaux les mêmes et la composition des liquides uniforme. Dans les conditions de l'expérience, ce terme ne sera atteint que lorsque tout le sucre aura dialysé.

Il est clair, en effet, que si l'on renouvelle un assez grand nombre de fois l'eau du vase extérieur, on amènera l'abaissement du titre de la solution intérieure au degré que l'on voudra, et finalement on fera sortir tout le sucre de l'endosmomètre. Par exemple, si la capacité du vase extérieur est 9 fois celle de l'endosmomètre, après une première opération la quantité de sucre de l'osmomètre sera réduite à 1/10 de la valeur primitive : une seconde opération la réduira à 1/100, soit $1/10^2$; la troisième à 1/1000, soit $1/10^3$. Après n opérations, la quantité sera réduite à $\frac{1}{10^n}$ de sa valeur primitive. C'est dire que l'on peut la rendre aussi petite que l'on voudra, et, en définitive, drainer tout le sucre, ou, en d'autres termes, enlever à la solution primitive toute la substance qu'elle contient.

Au lieu de ces opérations successives, on peut pratiquer une opération continue en entretenant une circulation d'eau pure dans le vase extérieur. Le résultat sera le même.

On trouve là le principe de la *méthode d'analyse chimique immédiate* qu'on appelle *dialyse* ou *diosmose*. Elle était en germe dans l'exosmose de Dutrochet, d'où Dubrunfaut et Graham la firent sortir. Il faut noter, cependant, que Dutrochet s'est préoccupé surtout de l'endosmose, ou plus exactement des manifestations sensibles de la première phase de l'osmose. Il a laissé de côté l'exosmose.

11. Comparaison des liquides différents, au point de vue de leur énergie osmotique. — Dutrochet avait constaté des différences considérables dans l'énergie endosmique des solutions diverses. Mais le principe d'une comparaison rationnelle, à cet égard, lui faisait défaut.

Les premières expériences avaient fait croire que le pouvoir osmotique était en rapport avec la densité ; par exemple, que le courant prédominant, endosmotique, s'établissait du liquide le moins dense vers le plus dense. Des exemples nombreux ne tardèrent pas à infirmer cette induction trop hâtive. On vit que diverses solutions de substances salines ou de substances organiques avaient des qualités d'osmose spéciales, indépendantes de leur densité.

Exemples :

1° L'expérience de l'abbé Nollet (Voy. n° **19**, note) : si l'on sépare de l'eau et de l'alcool par une membrane animale, on constate que le mouvement a lieu de l'eau (liquide plus dense) vers l'alcool moins dense ; 2° avec les solutions d'acides tartrique, citrique, oxalique, chlorhydrique, etc., le courant est dirigé tantôt vers l'acide, c'est-à-dire le liquide le plus dense (solutions fortes), tantôt vers l'eau, c'est-à-dire le liquide qui l'est le moins (solutions faibles) ; 3° si l'on acidule de l'eau sucrée (1 sucre, 16 eau) avec l'acide oxalique (1 partie), l'osmose s'inverse et se fait alors de la solution sucrée vers l'eau pure.

Ces faits montrèrent bien à Dutrochet l'*indépendance des phénomènes osmotiques d'avec la densité*. Cependant, lorsqu'il s'agit de comparer des substances diverses (que ces expériences très simples lui avaient montré très différentes à ce point de vue), en l'absence de toute base rationnelle de comparaison, il recourut à la densité. Il mesura les pouvoirs osmotiques de solutions de même poids spécifique. C'est ainsi qu'il prépara des solutions de densité identique (1,01) de sucre, de gélatine, de gomme arabique et d'albumine. Voici les résultats :

Solutions de densité.		Pouvoir osmotique.
—		—
$d = 1{,}01$....	Gélatine (teneur : 0,041)........	3
»	Gomme arabique.............	5,1
»	Sucre.........................	11
»	Albumine (teneur : 0,041)........	12

Il apparaît que le pouvoir osmotique de l'eau sucrée est l'un des plus élevés parmi ces substances organiques ; il est double du pouvoir de l'eau gommée ; il est quadruple de celui de l'eau gélatineuse.

Autre résultat : à égalité de densité, la solution de sulfate de soude a un pouvoir osmotique double de celui de l'eau salée.

Aujourd'hui, à la suite des travaux de Van t'Hoff, de De Vries, de Pfeffer, des comparaisons de ce genre ne sont plus nécessaires : les pouvoirs osmotiques se déduisent des poids moléculaires, et l'on admet que ce qui règle l'osmose c'est le nombre des molécules qui existent dans le volume spécifique de la substance.

Cette remarque enlève une grande partie de leur intérêt aux déterminations comparatives que Dutrochet a faites de liquides de même nature, mais de concentrations différentes. Il n'est cependant pas entièrement inutile de les rappeler ici.

12. Comparaison des liquides de même nature, de concentrations différentes. — Si l'on considère des solutions aqueuses d'une même substance répondant à différentes concentrations, le problème se simplifie évidemment. On pourra mesurer les pressions osmotiques et les comparer aux densités de ces solutions, à leurs degrés de concentration. C'est ce que fit Dutrochet.

Dans une première série d'expériences portant sur les solutions de sucre, il détermina, non pas précisément les pressions osmotiques, mais les vitesses osmotiques. Cette substitution est d'ailleurs une complication, parce que la vitesse osmotique est un élément variable avec les conditions de l'expérience, et en particulier avec la nature de la membrane ; celle-ci règle les rapports de l'endosmose et de l'exosmose — et par conséquent la vitesse de l'ascension — la *vitesse osmotique* (Voy. n° **7**).

Quoi qu'il en soit, voici un type d'expérience de Dutrochet :

Expérience. — Avec le même osmomètre on étudie successivement les trois solutions sucrées suivantes, placées dans le vase endosmométrique :

1° Sucre : 1. Eau : 4. Densité :	Ascension en millim. en 1 h. 1/2. –	2° Sucre : 1. Eau : 2. Densité :	Ascension en millim. en 1 h. 1/2. —	3° Sucre : 1. Eau : 1. Densité :	Ascension en millim. en 1 h. 1/2. —
d au début = 1,083 d' à la fin = 1,078 Moyenne = 1,080	*39*	d au début = 1,145 d' à la fin = 1,138 Moyenne = 1,141	*68*	d au début = 1,228 d' à la fin = 1,216 Moyenne = 1,222	*106*

Les vitesses osmotiques croissent donc très nettement avec les concentrations et avec les densités. On constate que les vitesses sont comme le nombre 1 ; 1,76 ; 2,77 ; elles ne sont pas proportionnelles aux quantités de sucre (1, 2, 4) ; elles le sont encore moins aux densités des solutions (densité moyennes : 1,080 ; 1,141 ; 1,222). Mais si on les compare aux différences de densités des liquides avec l'eau, on s'aperçoit que la proportionnalité existe. Ces nombres sont : 0,080 ; 0,141 ; 0,222, qui sont entre eux précisément comme 1 ; 1,76 ; 2,77, c'est-à-dire comme les vitesses.

D'où cette loi :

Les vitesses d'endosmose correspondant aux diverses densités d'un liquide intérieur sont proportionnelles aux excès de la densité de ces liquides intérieurs sur la densité de l'eau (liquide extérieur).

Dutrochet répéta la même expérience en mesurant cette fois — ce qui est une expérience plus claire — les *pressions osmotiques*.

Expérience. — On prend 3 solutions sucrées, de densités 1,035, 1,070, 1,140, dont, comme on le voit, les excès de densité sur celle de l'eau sont comme les nombres 1, 2, 4.

La première solution s'élève dans l'osmomètre à une hauteur de 286 millimètres, évaluée en mercure, hauteur maxima atteinte en 28 heures. Sa densité était alors tombée à 1,025 ; elle contenait 1 de sucre pour 16 d'eau.

La deuxième solution s'arrêta à 617 millimètres de mercure, après 36 heures : la densité était tombée à 1,053 ; elle contenait alors 1 de sucre pour 7 d'eau.

La troisième solution s'arrêta à 1,238 millimètres après 48 heures : la densité était 1,110 ; la teneur : 1 de sucre pour 3 d'eau.

Les densités finales sont donc : 1,025, 1,053, 1,110, dont les excès sur l'eau sont : 0,025, 0,053, 0,110.

Les hauteurs ou pressions osmotiques sont dans les mêmes rapports, 238 millimètres, 606 millimètres, 1,258 millimètres.

La loi est donc la même pour les vitesses et pour les pressions osmotiques. Pour ces dernières, elle s'énonce ainsi :

Les pressions osmotiques correspondant aux diverses densités d'une même solution intérieure — l'eau pure étant le liquide extérieur et la température constante — sont proportionnelles aux excès de densité (au moment de l'équilibre) de la solution sur l'eau extérieure.

Cette loi est fort intéressante, mais Dutrochet reconnut lui-même qu'elle n'était point d'une application générale.

13. *Influence de la température.* — La température a une influence marquée sur l'osmose. Dutrochet s'est assuré que l'élévation de température favorisait l'échange osmotique. En étudiant l'osmose d'une solution gommeuse (à 1 p. 10) contre l'eau, aux températures de 4° d'abord et de 26° ensuite, il constata que la pénétration de l'eau dans l'osmomètre avait été beaucoup plus active dans le second cas ; en 1 heure 1/2 il y avait pénétré 23 parties d'eau au lieu de 13. Quant à la nature précise de cette relation, les déterminations numériques ne permettaient pas de l'établir. Ce sont les études de Van t'Hoff qui l'ont révélée. Elles ont fait ressortir que cette relation était la même que pour les pressions gazeuses exercées par une même masse de gaz. En d'autres termes la pression, osmotique croît proportionnellement au binôme de dilatation $(1+\alpha t)$; ou, encore, elle est proportionnelle à la température absolue $273+t$. On a en effet :

$$\alpha=\frac{1}{273};\ 1+\alpha t=1+\frac{1}{273}t=\frac{1}{273}(273+t)=\frac{1}{273}\mathrm{T}$$

$$1+\alpha t=\frac{\alpha}{\alpha}\left(\frac{1}{\alpha}+t\right)=\alpha\mathrm{T}.$$

14. *Théorie de l'osmose.* — Diverses théories furent mises en avant pour rendre compte des phénomènes que Dutrochet venait d'observer. Le caractère commun de toutes ces théories est de chercher l'explication des phénomènes d'osmose dans les propriétés de la membrane, et plus particulièrement dans sa constitution physique : *porosité*, *capillarité*, ou dans sa constitution chimique, *affinité* pour les liquides osmosants (Dutrochet). L'osmose était donc considérée comme une *propriété de membrane*.

La membrane joue, en effet, un rôle dans le phénomène, puisqu'il n'a pas lieu sans elle. Mais les théories récentes ont montré qu'il fallait res-

treindre ce rôle, le diminuer; elles ne lui assignent plus que la valeur d'une *condition*, c'est-à-dire d'une circonstance qui en permet la manifestation. Ce n'est pas dans la membrane que résident les forces véritablement actives : c'est dans les liquides mêmes.

Quoi qu'il en soit, l'étude de la cloison osmotique présente un intérêt considérable qui oblige à y insister.

§ II. — MEMBRANES OSMOTIQUES

Sommaire. — **15**. Variétés des cloisons osmotiques. Cloisons artificielles, cloisons naturelles. — **16**. Rôle de la porosité : porosité moléculaire; porosité de structure. — **17**. Insuffisance de la capillarité pour l'explication de l'osmose. Viscosité. — **18**. Mesure de la perméabilité. Indépendance de la perméabilité et de l'osmose. — **19**. Affinité de la substance de la cloison Osmotique pour le liquide endosmosant.

A. **Cloisons naturelles.** — **20**. Constitution des membranes animales. Théorie micellaire : eau de constitution; eau d'adhésion; eau de capillarité. — **21**. Image théorique du phénomène de l'osmose. — **22**. Membranes osmotiques naturelles. — **23**. Membrane cellulaire; membrane protoplasmique. Perméabilité et hémiperméabilité. — a. *Cellules végétales*. — **24**. Perméabilité de la membrane cellulaire pour les liquides diffusibles. — **25**. Hémiperméabilité de la couche protoplasmique externe. — **26**. Échanges osmotiques dans la cellule végétale. — **27**. Restriction à l'hémiperméabilité de la paroi cellulaire. — b. *Cellules animales*. — **28**. Échanges osmotiques de la cellule animale. Ectoplasme hémiperméable.

B. **Cloisons artificielles.** — **29**. Membrane hémiperméable artificielle. Ses avantages pour l'étude de l'osmose. — **30**. Caractères fondamentaux des membranes de précipité : structure amorphe, imperméabilité aux membranogènes. — **31**. Membranes de précipité en cloisons, en cellules (de Traube). — **32**. Membranes de ferrocyanure de cuivre. Autres membranes : bleu de Prusse, phosphate de chaux, etc. — **33**. Osmomètres de démonstration. — **34**. Osmomètre de Pfeffer. Principe de sa construction. — **35**. Détails de la préparation de l'osmomètre : 1° Choix des vases poreux; 2° Nettoyage des vases et formation de la membrane osmotique; 3° Tube manométrique; 4° Vérification de l'instrument; 5° Précaution contre la rupture de la cloison osmotique; 6° Cloisons osmotiques diverses; 7° Régénération. — **36**. Mesures osmométriques. Précautions nécessaires. Invariabilité de la température. — **37**. Modifications ultérieures de l'appareil de Pfeffer. Appareil de Tammann. — **38**. Considérations théoriques sur la constitution de la membrane de précipité. — **39**. Rapport entre la constitution des membranes de précipité et le mouvement osmotique de l'eau. — **40**. Caractères distinctifs entre les membranes hémiperméables et les membranes ordinaires. — **41**. Les membranes de précipité ne possèdent qu'une hémiperméabilité relative. — a. Expériences de Pfeffer. — b. De Tammann. — c. De Meerburg. — d. De Walden. — e. Conclusions. — **42**. Conséquences relatives à la théorie de la diosmose à travers les membranes. — 1° Théorie du tamis ou du crible. La membrane diosmotique arrête les grosses molécules; 2° Théorie de la solution. La membrane diosmotique est un solvant du corps diosmosant; 3° Théorie de l'hydro-diffusion; 4° Théorie de la vaporisation. Diosmose de l'eau.

15. Variété des cloisons osmotiques : cloisons artificielles ; cloisons naturelles. — Dutrochet a étudié un grand nombre de membranes ou de cloisons. Il a employé des membranes animales, et le plus habituellement une membrane taillée dans la vessie de porc ; puis encore la peau de grenouille, de torpille, d'anguille ; l'intestin, le cæcum du poulet ; la baudruche, la membrane coquillière de l'œuf, etc. Parmi les membranes végétales, il a utilisé la gousse de baguenaudier, les gaines de poireau, etc. ; des membranes de caoutchouc, de taffetas gommé ; des cloisons de grès, de porcelaine dégourdie, d'argile blanche ou terre de pipe, des plaques de marbre, de pierre à bâtir, de chaux sulfatée.

Depuis les recherches de Dubrunfaut et de Graham sur la *dialyse* (qui n'est autre chose que l'utilisation de l'exosmose), on a pris l'habitude d'em-

ployer le *parchemin végétal*. On l'obtient en prenant du papier non collé et bien homogène, c'est-à-dire du bon papier-filtre, et en le plongeant pendant quelques minutes dans un mélange refroidi de 2 volumes d'acide sulfurique concentré avec 1 volume d'eau, en lavant ensuite à grande eau et laissant sécher. Ce papier parcheminé ne doit pas être trop perméable, trop poreux : une éponge mouillée doit pouvoir être passée sur l'une des faces sans produire de tache d'humidité de l'autre côté.

Toutes ces cloisons variées qui ont servi à l'étude physique de l'osmose peuvent être dites *artificielles*, car, lors même qu'elles sont empruntées aux êtres vivants, comme la vessie de porc ou la gousse du baguenaudier, elles sont utilisées dans des conditions différentes de celles où elles fonctionnent réellement et physiologiquement.

Il faut remarquer d'ailleurs que ces cloisons présentent pour ainsi dire tous les degrés au point de vue de leur aptitude osmotique, depuis la porcelaine dégourdie où elle est à peu près nulle, les plaques calcaires où elle est très faible, jusqu'aux cloisons et aux membranes animales et végétales où elle est bien marquée.

A cette catégorie, il faut en adjoindre une autre, celle des cloisons osmotiques *naturelles* ou *biologiques* qui interviennent réellement dans les phénomènes vitaux, parois vasculaires et glandulaires. Mais, parmi celles-ci, la première importance appartient aux *membranes de l'élément anatomique de la cellule*: la *membrane cellulaire* et la couche la plus externe du corps protoplasmique, ectoplasma ou *membrane plasmique*. Ces deux espèces de cloisons sont les instruments de tous les phénomènes osmotiques qui intéressent la physiologie.

Au point de vue de la manière dont ces diverses cloisons se comportent dans l'exécution des phénomènes osmotiques, il faut établir une distinction tout à fait essentielle, celle des cloisons *entièrement perméables* et des cloisons *hémiperméables*. Les cloisons perméables permettent le double transit qui caractérise l'osmose : ce sont les seules qui aient été connues jusqu'à une date assez récente (1865 à 1877) : la *membrane cellulaire* appartient à ce groupe. Les cloisons *hémiperméables* ne sont perméables que pour l'un des liquides; pour préciser, elles ne peuvent être traversées que par l'eau pure. C'est le cas des cloisons colloïdales, cloisons artificielles en ferrocyanure de cuivre, employées par Traube (1865) et Pfeffer (1877); c'est aussi le cas de la *membrane plasmique*, parmi les membranes naturelles.

16. *Rôle de la porosité. — Porosité moléculaire. — Porosité de structure : perméabilité.* — Qu'a-t-on vu de commun entre ces cloisons si diverses? A quelle particularité commune a-t-on attribué leur rôle osmotique? On a invoqué leur *porosité*.

On a fait remarquer que toutes sont poreuses. Mais c'est là une notion qui a besoin d'être analysée. Il y a, en effet, deux espèces de *porosité* (1) ;

(1) Cette distinction est utile pour faciliter une première analyse des phénomènes. Mais on comprend immédiatement qu'elle n'offre pas un caractère absolu. Il y a pour ainsi dire tous les degrés entre les corps les plus homogènes en apparence, les plus compacts, provenant de

une *porosite moléculaire* et une *porosité de structure*. La porosité moléculaire tient à la constitution physique de la matière, laquelle ne peut être supposée continue et qui laisse nécessairement des vides, *pores moléculaires*, entre les agrégats d'atomes, c'est-à-dire entre les *molécules* qui la constituent. Or, cette porosité intervient, en effet, dans le phénomène d'osmose, parce que c'est elle qui permet la *dissolution* et la *diffusion* des substances les unes dans les autres, condition essentielle de l'osmose, ainsi qu'on le sait depuis Graham.

La *porosité de structure* est une particularité accidentelle de quelques corps; elle est offerte naturellement et au plus haut degré par les éponges, la pierre ponce, les pâtes desséchées, le grès, le plâtre gâché, l'argile, le sucre raffiné, les membranes feutrées, etc. Les pores sont alors des lacunes, des vides souvent considérables, qui peuvent devenir appréciables à l'œil nu et se prêtent au jeu des forces capillaires, tandis que les pores moléculaires, au contraire, échappent aux sens, comme les molécules elles-mêmes, parce qu'ils sont sensiblement du même ordre de grandeur. Cette porosité de structure n'existe point dans les corps liquides ou pâteux, et, en général, dans les corps qui proviennent de fusion ou de coulée. Elle intervient aussi dans le phénomène d'osmose, d'une façon accessoire, à son début, et pour ainsi dire pour l'amorcer. C'est à elle que sont dus les phénomènes d'*imbibition*, de *filtration*; elle se mesure sous le nom de *perméabilité*.

L'osmose est un phénomène complexe résultant du concours de plusieurs causes physiques. La porosité de structure du corps, c'est-à-dire la perméabilité, y fait intervenir les forces capillaires. Mais celles-ci ne suffisent pas. Au point de vue des forces qui produisent l'osmose, Dutrochet a bien mis en lumière ces deux points essentiels : l'insuffisance de la capillarité, l'intervention de l'affinité.

17. *Insuffisance de la capillarité de la cloison pour l'explication de l'osmose. Viscosité.* — La capillarité de la membrane joue un rôle restreint. L'insuffisance des forces capillaires résulte du désaccord qui se manifeste entre les mesures de la perméabilité et de l'osmose. Ce désaccord trouve son expression la plus forte dans le fait que l'osmose n'a pas lieu à travers les pores capillaires des cloisons siliceuses. Poisson, parmi les contemporains de Dutrochet, l'avait bien compris, et, dans la théorie mathématique qu'il proposa de l'osmose, il ne faisait intervenir les forces capillaires que pour amorcer le phénomène et expliquer l'imbibi-

coulées, et les corps les plus discontinus, les plus poreux par leur structure. La perméabilité est un phénomène relatif à la force qui la met en jeu (pression), à la nature des corps et aux circonstances (température). La chaleur augmente en effet les dimensions des espaces intermoléculaires. MM. Sainte-Claire Deville et Troost ont montré qu'un tube de fer fondu étiré à froid, de 3 millimètres d'épaisseur, convenablement chauffé, laissait passer l'hydrogène; à une température un peu plus haute, il laisse passer l'azote. Les vapeurs d'éther traversent le palladium à la température ordinaire. Avec des pressions suffisamment grandes, M. Caillet et a pu faire suinter le mercure à travers le fer.

tion initiale de la cloison. Au contraire, Magnus, pour avoir voulu attribuer à ces forces le phénomène tout entier, ne tarda pas à être démenti par l'expérience.

Pour le physicien allemand, il n'y avait pas d'autres facteurs que la capillarité du côté de la membrane, et du côté des liquides la viscosité, c'est-à-dire la différente manière d'être de ces liquides vis-à-vis des forces capillaires.

Selon Magnus, le déversement des liquides d'un côté à l'autre de la membrane était le fait des actions capillaires, et la prédominance d'un des mouvements sur l'autre, du déversement de l'eau sur celui du sirop, par exemple, tenait à ce que les actions de cette nature sont moins efficaces avec les liquides les plus visqueux. Mais, précisément, on peut mesurer la viscosité et constater qu'elle est sans rapport avec le degré de l'osmose.

La viscosité d'un liquide, en effet, peut s'apprécier, entre autres moyens, par le degré de sa facilité à s'écouler par un tube capillaire. Il est facile d'en avoir une mesure relative en notant les durées d'écoulement de divers liquides par un tube capillaire sous une même charge. Par exemple, Dutrochet constate que sous une même pression, avec le même tube capillaire et dans les mêmes conditions de température, une même quantité (150 centimètres cubes) de divers liquides, solution sucrée ($d = 1{,}014$), solution gommeuse ($d = 1{,}023$), met à s'écouler, 157 secondes dans le premier cas, 159",5 dans le second, 326",5 dans le troisième. Ces nombres 157, 159,5, 326,5 expriment les viscosités relatives des trois liquides. On voit que la solution gommeuse est un peu plus de deux fois plus visqueuse que la solution sucrée. Or, si l'on place ces deux liqueurs dans l'osmomètre, on constate que le courant a lieu de l'eau gommeuse vers l'eau sucrée, c'est-à-dire du liquide le plus visqueux à celui qui l'est le moins. Et ceci est contraire à l'explication de Magnus.

18. Mesure de la perméabilité. Indépendance de la perméabilité et de l'osmose. — Lorsque l'on met une cloison poreuse en présence d'une liqueur capable de la mouiller (supposons qu'il s'agisse de l'eau), celle-ci ne tarde pas à pénétrer par capillarité dans son épaisseur et, si la pression exercée sur l'eau est suffisante (pesanteur, pression artificielle), à la traverser et à filtrer de l'autre côté. Cette capacité de filtration, ou *perméabilité*, n'a qu'un rapport éloigné avec l'osmose.

On peut en fournir deux démonstrations. La première consiste à remarquer l'existence des phénomènes essentiels de l'osmose à travers des cloisons sans perméabilité formées par des liquides solidifiés (gélatine) ou même des liquides vrais (cas de la diffusion osmotique).

La seconde démonstration a été fournie par Dutrochet : c'est la constatation expérimentale du désaccord entre la capacité de perméabilité et la capacité d'osmose.

Il est facile de s'assurer si deux cloisons ont une égale perméabilité, une égale faculté de filtration ; en un mot de *mesurer leur perméabilité relative*.

Il suffit de remplacer dans l'osmomètre la cloison membraneuse par une plaque de la substance que l'on veut examiner ; on remplit d'eau les deux vases, intérieur et extérieur, en ménageant une différence de niveau initiale au profit du flacon intérieur. On note l'abaissement de l'eau dans le tube. La dénivellation dans un temps donné, par exemple en vingt-quatre heures, mesurera la vitesse d'écoulement. On pourrait encore procéder d'une autre manière : maintenir constante la différence de niveau et mesurer le débit en un temps donné.

Par exemple, une membrane de vessie de porc avait perdu en vingt-quatre heures par filtration, dans les conditions de l'expérience, une quantité d'eau correspondant à une dénivellation de 21 millimètres. Il fallut amincir une plaque de marbre jusqu'à l'épaisseur de 1 millimètre pour que, dans les mêmes conditions expérimentales (même appareil, même différence de niveau

initiale, même température), elle laissât passer également une quantité d'eau correspondant à cette dénivellation de 26 millimètres. La perméabilité de la plaque et de la membrane de vessie étaient alors égales.

Or, Dutrochet a constaté que l'osmose à travers cette plaque de marbre était insignifiante, tandis qu'elle était considérable avec la membrane animale. La mesure des *vitesses osmotiques* a donné, pour la vessie, 83, contre 1 pour la plaque minérale.

Le cas extrême du désaccord entre la perméabilité et l'osmose est fourni par l'incapacité osmotique des cloisons siliceuses. Les phénomènes osmotiques sont insignifiants ou nuls avec les plaques de porcelaine dégourdie; ils sont au contraire très appréciables avec les plaques de terre de pipe (argile blanche). On peut avoir des plaques de ces deux substances possédant même perméabilité, et dont l'une sera capable et l'autre incapable d'osmose.

Une manière si différente de se comporter devant l'osmose, chez des corps aussi analogues à tant d'égards que la porcelaine dégourdie et l'argile blanche, est bien capable de jeter quelque lumière sur ce phénomène. Leur constitution chimique n'est pas très différente; des deux parts c'est un silicate d'alumine avec excès de silice dans le cas de la porcelaine, avec excès d'alumine dans le cas de l'argile; leur constitution physique les rapproche plus encore; l'une et l'autre sont poreuses, perméables à l'eau et aux solutions salines, et pouvant l'être à degré égal sous des épaisseurs convenables. Si l'on cherche un trait qui les distingue, on trouvera celui-ci: l'argile, ou plutôt l'alumine qui en est la base, fixe l'eau et la retient combinée avec tant de force qu'elle n'en est privée que par une cuisson énergique. Or, les membranes organisées, propres, elles aussi, à l'osmose, se trouvent dans le même cas. La remarque est de Dutrochet. L'eau a, en effet, une grande affinité pour les substances organisées, toutes plus ou moins hygrométriques.

19. Affinité de la substance de la cloison osmotique pour le liquide endosmotique. — D'après cela, la perméabilité de la cloison osmotique étant mise hors de cause, son caractère essentiel serait son affinité pour l'eau. Dans le cas général, ce caractère c'est l'affinité pour l'un des deux liquides mis en présence : c'est celui-ci qui précisément manifestera le courant le plus énergique, le courant d'endosmose.

Telle serait la signification de la cloison.

Ce serait une couche pénétrable à l'eau, de par sa constitution physique, et capable de s'hydrater à des degrés divers, de former des combinaisons diverses avec l'eau, de par ses propriétés chimiques. Nous allons voir que cette conception répond bien à l'idée que les histologistes se forment de la constitution des membranes animales, et particulièrement à la *Théorie micellaire* de Naegeli.

Mais auparavant, disons que cette vue est confirmée par l'étude de l'osmose entre l'alcool et l'eau. Elle se fait différemment, en effet, suivant la nature de la membrane qui les sépare. Si les liquides sont séparés par une membrane organique, qui a de l'affinité pour l'eau et non point pour l'alcool, on constatera un mouvement endosmotique énergique de l'eau vers l'al-

cool (1). Le contraire aura lieu si la cloison séparatrice est formée par une membrane de caoutchouc (qui est une sorte d'émulsion résineuse desséchée ayant de l'affinité pour l'alcool qui la mouille et la ramollit sans la dissoudre) : le courant endosmotique principal s'établira de l'alcool vers l'eau. On voit, par cet exemple, l'importance de la membrane et de son affinité pour l'un ou l'autre des liquides soumis à l'osmose. Et, incidemment, on notera que ce qui décide du mouvement des deux liquides, ce n'est pas leur différence de densité, ce ne sont pas les seules qualités physiques de la cloison (par exemple la porosité), communes à tous : ce sont des conditions qui font intervenir la nature propre de celle-ci, c'est-à-dire des conditions chimiques.

Il résulte de là que la cloison, en activité, constitue une sorte de composé, d'hydrate, différent de l'un et de l'autre liquide qu'elle sépare. *La membrane humectée (hydratée, dans le cas d'osmose entre liqueurs aqueuses) forme comme une troisième couche, un troisième liquide interposé aux deux autres et dans lequel ceux-ci peuvent inégalement se répandre, ou se diffuser.*

A. — Cloisons naturelles.

20. Constitution des membranes animales. Théorie micellaire. — Ce sont les membranes animales qui ont servi le plus généralement aux études osmotiques.

Elles sont constituées par un feutrage de tissu lamineux, de fibres conjonctives, criblé par conséquent de pores ou de lacunes. Ce feutrage est non seulement peu homogène, mais très peu comparable à lui-même, en général, dans ses diverses régions, ou à diverses profondeurs. La face externe et la face interne des membranes qui constituent les parois des cavités naturelles ne sont pas équivalentes pour l'osmose ; Matteucci et Cima ont montré que l'endosmose était plus aisée de la face interne vers la face externe. Du fait de leur constitution, ces membranes présentent donc, à l'état sec, la porosité de structure.

De plus, les membranes organisées sont, comme toute la matière organisée, hygrométriques, c'est-à-dire capables d'absorber de grandes quantités d'eau, environ quatre à cinq fois leur poids sec [coefficient d'hydratation de différents tissus 4,5 (Dastre)]. C'est un caractère distinctif de la matière organisée et des membranes organiques, par conséquent, d'incorporer de l'eau qui les gonfle sans les dissoudre, et, au résumé, d'en contenir une très grande quantité pour une faible proportion de matériaux propres, secs.

Lorsque l'on plonge une membrane de ce genre, non plus dans de l'eau pure, mais dans une solution saline, la membrane peut attirer l'eau plus énergiquement que le sel. Elle accroît alors la concentration de la liqueur restante. En fait, Ludwig et Cloetta ont constaté cette absorption, dans le cas des vessies animales, en déterminant les changements de composition de la solution où la membrane organique avait été plongée pendant un certain temps.

(1) C'est l'expérience de l'abbé Nollet. On remplit un verre d'alcool de manière qu'il soit plein à déborder : on applique sur les bords une membrane de vessie que l'on assujettit fortement par une ligature. Cet appareil est immergé dans l'eau. On voit la membrane se bomber de plus en plus au-dessus du verre, jusqu'à éclater.

La plus grande partie de l'eau absorbée n'est point déposée dans des espaces lacunaires préexistants, comme elle l'est dans les pores de la porcelaine dégourdie; elle se distribue uniformément entre les particules de la matière organisée.

La manière dont se fait cette distribution de l'eau, dans la matière organisée des membranes, échappe encore à l'observation scientifique. Mais il est possible de combler cette lacune de nos connaissances positives au moyen d'une hypothèse vraisemblable et d'ailleurs conforme à tous les faits connus jusqu'à ce jour. Nous voulons parler de la *théorie micellaire*, proposée par un savant éminent, Naegeli (1877).

D'après cette doctrine, la matière organisée est formée, non comme les corps inorganiques, de *simples molécules* physiques, celles-ci résultant elles-mêmes de groupement d'atomes soumis aux forces chimiques. Elle est formée d'*associations de molécules*, d'édifices moléculaires ayant figure, que Naegeli a appelés *micelles*. Dans la hiérarchie des matériaux de construction des organismes, après l'atome, après la molécule agrégat d'atomes, la micelle agrégat de molécules est au troisième rang de complication. Parmi les propriétés des micelles qui se rapportent à notre objet, il faut mentionner l'*attraction qu'elles exercent les unes sur les autres* et l'*attraction plus grande* qu'elles exercent sur l'eau. Dans les corps organisés, desséchés, les micelles sont rapprochées, serrées en ordre compact, séparées les unes des autres par une couche d'eau mince et adhérente à leur surface. Dans le corps organisé humide soumis à l'imbibition, les éléments micellaires avides d'eau l'ont attirée avec plus de force qu'ils n'en mettent à s'attirer entre eux, de telle sorte qu'ils ont été écartés pour lui faire place. C'est ainsi, par interposition de molécules aqueuses entre les micelles organiques (intussusception), que se produit l'accroissement de volume de la matière organique sous l'influence de l'eau; le même mécanisme intervient dans la production du *gonflement* et de la *turgescence*.

Le corps organisé se gonfle donc, mais ne se dissout pas. Il ne se dissout pas, selon Naegeli, « parce que la force d'attraction pour l'eau diminue plus rapidement que la force d'attraction des micelles entre elles lorsque celles-ci s'écartent, de telle sorte que quand les couches d'eau ont acquis une certaine puissance, il s'établit un état d'équilibre qui correspond précisément à la limite du gonflement ».

Telle est la constitution de la matière organique, en général, dans ses rapports avec l'eau. Et, pour en revenir à l'osmose en particulier, telle est la constitution de la *membrane cellulaire externe* de la cellule végétale.

Dans le protoplasma et dans chacune de ses parties : utricule primordial, couche ectoplasmique, endoplasma, — la constitution se complique. Les micelles ne sont pas uniformément réparties; elles sont unies en *chaînons* ou *filaments*. Ceux-ci, d'après l'ensemble des constatations micrographiques, sont distribués en réseaux à mailles plus ou moins larges, dont les interstices logent une partie de l'eau (eau de capillarité) qui imbibe la matière.

Enfin, cette matière protoplasmique est elle-même modelée de manière à prendre la figure des différents éléments anatomiques, cellules plates, cylin-

driques, fibres, etc. Et si, au dernier degré, nous envisageons un tissu, une membrane de tissu conjonctif, les éléments anatomiques y sont assemblés en un feutrage à lacunes relativement plus grandes, pouvant arriver à la dimension des objets sensibles, dans lesquelles s'insinuent, à l'état vivant, les liquides interstitiels, le plasma.

En résumé, si l'on néglige ces degrés de complication anatomique qui caractérisent les divers tissus vivants, pour n'envisager qu'au point de vue physique la matière propre qui y est mise en œuvre, l'analyse révèle la hiérarchie suivante : une matière (protoplasma) qui est une masse en réseau ; les fibres de ce réseau sont des chaînes de micelles ; celles-ci des agrégats spéciaux de molécules, elles-mêmes composées d'un assemblage d'atomes.

Il résulte de ces explications que l'eau peut se trouver dans la membrane osmotique organisée, comme dans toute matière organisée en général, à trois états qui diffèrent par le *degré de mobilité* ou de liberté de ses molécules. Une partie de l'*eau de constitution* est fixée sur les groupes atomiques : elle y est immobilisée par les forces chimiques, et il faudrait décomposer la matière pour la libérer. Une seconde portion est attachée à l'agrégat micellaire, et forme autour de lui une sorte d'atmosphère enfermant naturellement, avec les molécules de ce groupement, leur masse aqueuse propre. Cette atmosphère micellaire est composée de couches concentriques, dont la plus voisine de la surface du micelle y adhère le plus fortement par l'action des forces de cohésion, tandis que les couches plus éloignées sont de plus en plus lâchement retenues et de plus en plus mobiles; c'est l'eau *d'adhésion*. Enfin, entre ces micelles entourées de leur atmosphère aqueuse, dans leurs interstices, l'*eau de capillarité*, celle-ci libre et mobile.

21. Image théorique de l'osmose. — L'osmose de l'eau à travers une membrane ne met en jeu que l'*eau de capillarité* et l'*eau d'adhésion* ; c'est, du moins, ainsi que l'on doit, avec Pfeffer et les auteurs les plus récents, se représenter le phénomène, en conformité avec ce qui a été dit précédemment. L'eau qui chemine dans la cloison de l'osmomètre obéit en partie à la capillarité ; une autre portion est sujette à entrer en *union passagère* avec les atmosphères des micelles aqueuses, et à s'ajouter aux couches les plus excentriques; c'est de l'eau asservie par l'attraction micellaire et qui, par conséquent, ne peut manifester à leur ordinaire degré les propriétés et les caractères de l'eau libre. A la face interne de la membrane, au contact avec le liquide intérieur avide d'eau lui aussi, il s'établit un conflit. L'eau des couches excentriques circummicellaires est soutirée par le liquide intérieur, et, ainsi, l'atmosphère micellaire se détruit sans cesse à sa périphérie. D'autre part, elle se reconstitue sans cesse aux dépens de l'eau ambiante empruntée aux micelles plus profondes et encore pourvues de leur enveloppe aqueuse plus complète; ou bien encore elle se reconstitue aux dépens de l'eau de capillarité voisine. Et cet équilibre perpétuellement rompu et rétabli fait comprendre le cheminement endosmotique; on voit que celui-ci doit se continuer jusqu'à ce que l'attraction du liquide intérieur pour l'eau, dimi-

nuant à mesure qu'il se dilue davantage, ne soit plus en état de l'emporter sur l'attraction des micelles pour cette même eau.

Telle est l'image que l'on a pu se former du mouvement osmotique, en conformité avec les idées de Dutrochet, de Pfeffer, de Naegeli, en même temps qu'elle est aussi en accord avec les notions acquises par les micrographes. Si elle n'est pas la réalité, cette image des phénomènes en résume au moins les traits principaux, et particulièrement ces deux-ci qui sont les plus importants, à savoir : 1° que le jeu des forces capillaires ne suffit pas à l'explication de l'osmose ; 2° que l'affinité d'un des liquides qui traversent la cloison pour la substance même de cette cloison y remplit un rôle.

Cette image théorique des phénomènes de l'osmose a pu subsister jusqu'à la révolution accomplie par Van t'Hoff. Nous verrons plus loin qu'elle pourrait encore lui survivre.

22. *Membranes osmotiques naturelles.* — L'importance des phénomènes osmotiques est considérable en biologie. Les conditions de l'osmose sont, en effet, réalisées dans tous les organismes vivants et dans toutes leurs parties, jusqu'aux plus petites, c'est-à-dire jusque dans les éléments anatomiques, jusque dans la cellule. Partout on y rencontre des liquides miscibles, séparés par des membranes qu'ils peuvent mouiller. La force osmotique y constitue le rouage intime du mouvement des liquides ; elle est l'agent de l'incorporation et de l'élimination des substances, c'est-à-dire du circulus nutritif, des échanges matériels.

Comme nous le verrons plus loin, c'est précisément dans la cellule vivante, dans l'élément anatomique, que Naegeli, en 1855, et plus tard de Vries, ont trouvé le type de l'osmose et entrepris de l'étudier.

Il faut donc examiner les membranes qui entrent dans la constitution des cellules. On les étudiera d'abord chez les cellules végétales ; en second lieu, chez les cellules animales. Partout ces membranes sont perméables à l'eau; mais elles se distinguent les unes des autres par le degré de leur perméabilité aux autres substances.

a. Cellules végétales.

23. *Membrane cellulaire, membrane plasmique.* — Examinons d'abord les cellules végétales. La plupart possèdent une enveloppe, une *membrane cellulaire.* Les corps protoplasmiques nus (Myxomycètes, etc.) sont une exception dans le règne végétal, tandis qu'ils sont la règle chez les animaux. Cette membrane cellulaire, produit de sécrétion externe du protoplasme actif, est, au point de vue chimique, constituée essentiellement par la *cellulose*, hydrate de carbone voisin de l'amidon. Accessoirement, cette masse cellulosique peut s'*incruster* de sels calcaires, terreux (Algues, Characées, Cucurbitacées, etc.), ou d'acide silicique (Diatomées, Équisétacées, Graminées, etc.) ; elle peut se *lignifier* (lignine et vanilline déposées dans la masse de cellulose) ; elle peut enfin se *subériser* (dépôt de subérine non miscible à l'eau). Toutes ces particularités influent sur la perméabilité de la membrane.

Mais, ce qu'il importe de retenir, au point de vue de l'osmose, c'est que la *membrane cellulaire* a les propriétés ordinaires des cloisons osmotiques étudiées par Dutrochet; elle permet le transit dans les deux sens; lorsqu'elle sépare deux liquides, l'un et l'autre, simultanément, la traversent en sens inverse; les deux courants ont des vitesses très inégales (endosmose ou courant énergique, exosmose ou courant faible); les vitesses sont, pour deux liquides déterminés (eau, sirop de sucre), dépendantes de la membrane; elles varient suivant que l'on emploie telle cloison ou telle autre, et, dans ce cas, leur rapport même varie (1).

Mais, avec une même membrane, le rapport des énergies osmotiques reste invariable pour les mêmes liquides; la pression osmotique devient une caractéristique propre de chaque *liquide*, de sa composition, de son degré de concentration. Nous verrons plus loin quel rapport extrêmement simple existe précisément entre la composition d'un liquide et sa *caractéristique osmotique*, — ce nom désignant la constante qui caractérise l'intensité de l'osmose, soit la pression osmotique, soit la vitesse osmotique. En résumé, la membrane cellulaire végétale se comporte comme les cloisons osmotiques ordinaires, lorsqu'elle est placée, comme elles, entre deux liquides.

A la vérité, cette occasion ne lui est pas souvent offerte. Normalement, dans tous les cas (sauf le cas de la *plasmolyse cellulaire* qui sera examiné plus loin), il n'y a de liquide (liquide intercellulaire, interstitiel, sève) que d'un côté de la membrane, côté extérieur. En dedans, la membrane cellulaire est en contact, non pas avec un liquide, mais avec la surface du corps protoplasmique qui l'a produite et qui s'y applique exactement. Dans ces conditions, la membrane cellulaire ne constitue qu'un appareil de renforcement de la couche du protoplasma : ce ne sont point ses facultés osmotiques qui entrent en jeu, mais celles beaucoup plus caractéristiques du protoplasma lui-même.

Les cellules végétales jeunes, telles qu'on les trouve aux points végétatifs des plantes où elles se multiplient activement, sont constituées par la membrane cellulosique exactement appliquée sur la masse compacte du protoplasma. Mais bientôt cette masse se creuse de cavités, de vacuoles, plus tard confluentes, remplies par le suc cellulaire : de très bonne heure elle se réduit à une couche mince de protoplasma, qui double partout la membrane cellulosique (*utricule primordial de H. Mohl*); à la façon de la tenture qui tapisse les murs d'une chambre, selon la comparaison de Sachs.

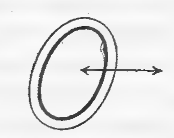


Fig. 430. — Cellule végétale; schéma de O. Hertwig.

Les conditions où s'exerce l'osmose sont donc, en général, celles-ci : à l'intérieur, le suc cellulaire; à l'extérieur, le liquide extracellulaire; entre les deux, une cloison osmotique *mixte* formée de la membrane cellulaire, qui n'est ici qu'une membrane perméable doublée par l'utricule primordial, couche de protoplasma à qui appartient le rôle principal.

(1) Ce sont ces variations qui rendent illusoires la détermination des *équivalents osmotiques* proposée par Jolly. (Voy. nº **125**.)

Or, la membrane protoplasmique est, elle, *hémiperméable*. C'est ainsi, au moins, que l'imaginent les cytologistes, à la suite des travaux de Pfeffer et de De Vries.

24. Perméabilité de la membrane cellulaire pour les liquides diffusibles. — Il importe d'insister sur cette condition des membranes de la cellule, l'une perméable, l'autre hémiperméable. La membrane cellulaire est perméable, en général, dans le sens où le sont les membranes osmotiques étudiées par les physiciens, c'est-à-dire capable de livrer passage dans les deux sens aux liquides, eau et solutions; facilement à l'eau, plus ou moins difficilement aux solutions. Parmi les solutions, Dubrunfaut d'abord (1853) et Graham ensuite (1862) plus complètement, ont montré qu'il y avait deux catégories à distinguer : les solutions *cristalloïdes* qui traversent les membranes plus ou moins facilement, et les solutions *colloïdes*, qui ne les traversent pas du tout ou à peu près pas.

Et c'est là une remarque de la plus haute importance à tous les points de vue. Elle l'est, en particulier, au point de vue de la nutrition, c'est-à-dire du phénomène fondamental de la vie, puisqu'il en résulte que la cellule végétale munie d'enveloppe ne peut être pénétrée et nourrie que par des liquides cristalloïdes ou diffusibles. Si ceux qui lui sont amenés ne le sont pas d'ores et déjà, il faudra qu'ils soient préalablement transformés et réduits à cette condition préliminaire; il le faut de toute nécessité pour l'accomplissement des phénomènes ultérieurs de nutrition. Les matériaux alimentaires sont donc soumis, au préalable, à une opération qui les rend diffusibles : c'est la digestion.

On voit ainsi la digestion et sa nécessité liées à cette condition physique de la membrane cellulaire et de toutes les cloisons osmotiques de n'être perméables qu'à une catégorie de solutions, les solutions *cristalloïdes* ou *diffusibles*.

25. Hémiperméabilité de la couche protoplasmique, et en général du protoplasma. Restrictions. — Nous venons de dire que la *membrane cellulaire*, comme les cloisons osmotiques en général, opposait une certaine résistance au passage des substances dissoutes, et une résistance très grande et presque absolue au passage de celles de ces substances nommées colloïdes.

La *couche protoplasmique* (utricule primordial) oppose, en outre, la même résistance à la pénétration des cristalloïdes; c'est-à-dire, en définitive, qu'elle résiste au passage de toutes les substances dissoutes. Elle est *hémiperméable*, ce qui veut dire qu'elle n'est perméable qu'à l'eau.

C'est là une assertion qui mérite d'être examinée de près.

A priori, on est tenté d'admettre que le protoplasma doit être pénétrable, c'est-à-dire perméable pour le plus grand nombre des substances intercellulaires, c'est-à-dire pour les liquides interstitiels qui lui apportent précisément les matériaux de son accroissement et de son fonctionnement.

Mais, à la réflexion, on conçoit pourtant qu'il suffit, en définitive, que les

substances réparatrices ou génératrices d'énergie soient amenées au contact du protoplasma. Il ne faut pas autre chose que ce contact, pour que le conflit ait lieu avec ses conséquences chimiques qui s'étendront ensuite au reste de la masse, de proche en proche; on ne voit pas l'absolue nécessité que le conflit ait lieu dans toute la masse, simultanément pénétrée.

On sait, en outre, que c'est précisément un caractère du protoplasma vivant de résister à la pénétration des substances étrangères, de la plupart des matières colorantes par exemple. L'utilité d'une semblable résistance pour la protection et la préservation de l'édifice cellulaire est trop évidente pour qu'il soit nécessaire d'y insister.

26. *Échanges osmotiques dans la cellule végétale.* — Les vacuoles qui se produisent d'une manière très précoce dans le protoplasma de la cellule végétale se remplissent d'un liquide, *suc cellulaire*, qui est *élaboré* par ce protoplasma même et non pas simplement importé du dehors par osmose ou par filtration. C'est une production de la cellule végétale, une *sécrétion interne* du protoplasma, au même titre que les autres enclaves plus ou moins liquides des cellules animales, telles que graisse, glycogène, mucus, etc. Lorsque ces vacuoles se sont multipliées, ont grandi et se sont enfin fusionnées en une cavité unique, la *cavité cellulaire*, cette condition reste la même. La cellule végétale adulte doit donc être considérée comme un sac dont la paroi mince est formée de deux couches, l'une cellulosique, membrane cellulaire; l'autre protoplasmique, utricule primordial avec le noyau. A son intérieur se trouve le suc cellulaire, produit d'élaboration du protoplasma et non de l'apport extérieur direct : il ne peut recevoir du dehors, en définitive, que de l'eau; toutes les autres substances sont des produits d'activité propre.

Et, en effet, la cellule végétale ainsi constituée peut absorber de l'eau (gonflement, turgescence) ou en perdre (plasmoylse, dessiccation, fanement, ratatinement), suivant la nature du liquide qui la baigne. Elle est le siège d'échanges osmotiques qui portent seulement sur l'eau. L'eau seule passe directement du dehors dans le suc cellulaire : les autres substances sont arrêtées, les colloïdes à l'extérieur de la membrane cellulaire, les cristalloïdes au contact de l'utricule primordial; les premières inutilisables, les secondes utilisées à ce contact. Voilà, croyons-nous, dans quel sens il faut entendre cette expression que la *paroi* de la cellule est *hémiperméable* ou *semi-perméable*. Cela s'entend de la paroi entière et particulièrement de sa couche protoplasmique; ce ne serait ni vrai, ni possible, de la *membrane* cellulaire.

Cette *hémiperméabilité*, qui réduit les échanges osmotiques de la cellule végétale à des échanges d'eau, est-elle une propriété vitale, un trait spécial du protoplasma vivant? En aucune façon. Elle appartient à d'autres membranes, inertes, minérales : c'est donc une propriété physique. Le grand mérite de Pfeffer est précisément, en utilisant une remarque de Traube, d'avoir réalisé des membranes de ce genre, telle, par exemple, la membrane de ferrocyanure de cuivre gélatineux qui est le type de la paroi

protoplasmique et du protoplasma en général, au point de vue des échanges osmotiques, — et d'avoir fourni ainsi un modèle purement physique de ces échanges dans la cellule vivante (Voy. n° ***32***).

Grâce à cette hémiperméabilité, les mouvements de l'eau à l'intérieur de la cellule peuvent être très étendus. Le suc cellulaire peut attirer des quantités de ce liquide qui distendent (comme nous l'expliquerons plus loin, n°s ***52*** et ***54***) la paroi et y créent une pression interne souvent considérable. Naegeli a donné le premier exemple d'une pression de ce genre, supérieure à la pression atmosphérique, dans des cellules de *Spirogyra*. Il suffit, pour la mettre en évidence, de couper au rasoir un filament de cette algue ; si le tranchant du rasoir a entamé une seule cellule, en respectant les deux cellules voisines, on voit les parois transverses de celles-ci se bomber l'une vers l'autre. Cet effet est dû à ce que leur pression interne n'est plus contre-balancée par celle de la cellule intercalaire que l'effraction a ramenée au taux extérieur.

27. Restrictions à l'hémiperméabilité de la paroi cellulaire. — Il y a lieu cependant d'apporter une restriction à la rigueur excessive des assertions précédentes. L'*hémiperméabilité* absolue est un cas extrême, idéal, dont la réalité se rapproche plus ou moins. Il n'est pas exact que la paroi de la cellule végétale soit également imperméable dans un sens et dans l'autre à toutes les substances autres que l'eau, ni qu'elle le soit absolument à une substance donnée.

Il est vrai que beaucoup de plantes supérieures, plongées dans des solutions de diverses substances salines ou organiques, azotate de potasse, chlorure de sodium, sucre, n'en absorbent pas des quantités sensibles même après un assez long contact, par exemple après vingt-quatre heures. C'est là le fait fondamental qui sert de base à la doctrine de l'imperméabilité du protoplasma aux substances autres que l'eau. Mais ce fait comporte de nombreuses exceptions.

En effet, tous les éléments cellulaires, tous les protoplastes, sont pénétrables à la *glycérine* et à l'*urée*, à des degrés divers (de Vries, Klebs). Il y en a pour lesquels la pénétration est extrêmement rapide et facile. Il y en a pour lesquels elle est difficile et en quelque sorte réduite au minimum : telles les écailles foliacées du *Begonia manicata*.

Le protoplasma de beaucoup de cellules vivantes peut être pénétré par le bleu de méthylène.

Le plasmodium des Myxomycètes absorbe facilement l'asparagine.

Le protoplasma des bactéries est facilement perméable aux substances salines ou organiques ; d'ailleurs, cette facilité d'absorption explique le fait que ces organismes sont très sensibles à l'action des liquides ambiants, et leur accommodation aux milieux divers. Elle doit être attribuée à leur petitesse, c'est-à-dire à la grandeur des surfaces par rapport à la masse.

L'exemple des cellules animales prouve que le protoplasme est pénétrable à certaines substances déterminées ; c'est ainsi que le protoplasma des globules rouges, imperméable aux sels de sodium, est perméable à l'urée.

Les cellules du rein, imperméables au sucre et à l'albumine dans les conditions normales, sont perméables aux sels.

Un dernier argument est offert par le phénomène fréquent de la régression de la plasmolyse. La plasmolyse (Voy. plus loin, n° **56**) a précisément pour cause la perméabilité à l'eau par opposition à l'imperméabilité aux substances dissoutes ; elle ne se soutient pas invariablement. On la voit diminuer. C'est la preuve d'une absorption lente, ou l'effet d'une transformation subie par les substances du protoplasma (Voy. n° **58**).

Il semble que le protoplasma se comporte, suivant les cas, à la façon d'une cloison perméable seulement à l'eau — ou à la façon d'une membrane perméable à certaines substances dissoutes. Il serait donc tantôt perméable et tantôt hémiperméable. C'est l'opinion de Godlewski. Ce savant botaniste rattache l'hémiperméabilité à la condition ordinaire du protoplasma, la perméabilité à son état de contraction ; mais ce sont là des vues encore hypothétiques. Il faut seulement retenir que l'hémiperméabilité ne peut pas être une propriété absolue ou permanente : elle comporte des exceptions et des rémissions, en rapport avec des changements correspondants de la matière vivante.

Enfin, nous aurons l'occasion de voir tout à l'heure, à propos des membranes semiperméables artificielles, que pour celles-là aussi l'imperméabilité aux substances autres que l'eau n'a rien d'absolu (n° **41**).

b. Cellules animales.

28. ***Échanges osmotiques de la cellule animale, ectoplasme hémiperméable.*** — La cellule animale est l'équivalent d'une cellule végétale très jeune. La membrane cellulaire y fait le plus souvent défaut et l'élément anatomique se réduit à la masse protoplasmique (corps cellulaire) avec le noyau. La formation de vacuoles et la séparation du suc cellulaire y sont extrêmement rares : on les observe cependant chez les Rhizopodes, les Radiolaires, et, chez les Vertébrés, dans les cellules de la corde dorsale. Par contre, les enclaves semi-solides y sont très nombreuses et forment le pendant des vacuoles ; leur contenu, glycogène, mucus, graisse, myéline, y représente un suc cellulaire condensé. Le protoplasma du corps cellulaire se trouve, par cela même, creusé de cavités et de lacunes qui peuvent, lorsque ces productions sont très abondantes, le réduire à l'état de travées, de cloisons minces, remplissant les interstices de séparation des masses enclavées, comme le *mortier* sépare les pierres d'une muraille, selon la comparaison de O. Hertwig ; ou encore, pour employer une autre comparaison qui s'applique mieux à certains Protozoaires, la masse protoplasmique y forme un système de minces lamelles comme celles de la *fine écume* obtenue en fouettant avec de l'air de l'eau savonneuse ou albumineuse. C'est le cas de l'œuf et des cellules muqueuses, tout au moins dans leur partie élargie.

Dans ces cellules animales nues, sans membrane, il y a cependant un équivalent de la paroi cellulaire ; c'est la couche *ectoplasmique*. La partie

la plus superficielle du protoplasma est différenciée du corps cellulaire et lui forme une sorte d'enveloppe, chargée de fonctions spéciales diverses, comme celle de se contracter sous certaines influences (fécondation, O. Hertwig) et de présider aux échanges osmotiques. Cet *ectoplasma*, assumant le rôle de la paroi cellulaire végétale (membrane et utricule primordial) arrête au seuil de la cellule les substances dissoutes, colloïdes et cristalloïdes, et ne laisse passer que l'eau ; en un mot, c'est une *cloison hémiperméable*. Mais, là aussi, l'assertion est trop rigoureuse et elle doit subir, en fait, des atténuations dont nous aurons à parler en examinant la manière dont la cellule se comporte osmotiquement vis-à-vis de diverses substances.

B. — Cloisons artificielles.

29. Membrane hémiperméable artificielle. Ses avantages pour l'étude de l'osmose. — Les explications précédentes permettent maintenant de comprendre l'importance de la considération des membranes hémiperméables. L'emploi de membranes de ce genre n'est pas seulement un artifice expérimental, sans réalité dans le monde naturel, et uniquement destiné à simplifier le problème physique ; c'est une reproduction exacte du phénomène biologique. L'osmose à travers les membranes *semiperméables*, c'est précisément l'osmose des cellules vivantes.

Au point de vue physique, on voit bien en quoi cette osmose unilatérale de Traube et Pfeffer diffère de l'osmose bilatérale de Dutrochet et quelle simplification elle apporte à l'étude du phénomène. Celui-ci se trouve scindé. Au lieu de confronter dans l'endosmomètre deux liqueurs quelconques, deux solutions salées, sucrées, etc., on n'a plus qu'à opposer une solution aqueuse à l'eau pure. On avait, avec les membranes ordinaires, deux courants (endosmose, exosmose) qui se contrariaient, dont on ne pouvait constater que la différence d'énergie, dont on ne pouvait apprécier et mesurer que les valeurs relatives ; de plus, ces courants ne permettent d'équilibre durable que dans le mélange homogène final des deux substances.

Maintenant, avec la membrane hémiperméable, on n'a plus qu'un seul courant (endosmose) ; l'eau seule est transportée : on peut mesurer, en valeur absolue, la vitesse de ce transport et la force qui le détermine ; il aboutit à un équilibre réel, à un état final qui est la plus haute expression des forces mises en jeu, marque le terme de leur action et permet leur mesure, c'est-à-dire la détermination de la pression osmotique.

D'autre part, si l'on veut revenir de là au cas général de deux solutions séparées par une membrane perméable, rien n'est plus aisé, si l'on sait la manière dont l'une et l'autre se comportent avec l'eau et si l'on connaît les valeurs de leurs pressions osmotiques. Il suffira d'en faire la différence.

On conçoit enfin que, de même que l'étude physique a son application à la biologie, de même l'étude biologique de l'osmose cellulaire peut servir à l'étude physique, puisque la cellule végétale est un osmomètre typique. De fait, le plus grand nombre des déterminations de pression osmotique ont été faites au moyen des cellules végétales (de Vries).

30. Caractères fondamentaux des membranes de précipité : État amorphe, imperméabilité aux membranogènes. — Les membranes hémiperméables artificielles sont dites encore : *membranes de précipité.* On en doit la découverte au physiologiste allemand Traube (1865) (1).

Les précipités qui se produisent dans certaines réactions chimiques peuvent prendre une forme membraneuse. Il se forme d'abord un voile, puis une membrane à la surface de séparation des deux liquides dont la réaction donne lieu au précipité : d'autres fois, la membrane apparaît au contact d'un liquide avec un solide (par exemple, cristal de sulfate de cuivre dans solution de ferrocyanure de potassium). Les composants peuvent être appelés *membranogènes.*

Ces membranes jouissent d'une propriété que Traube aperçut également : c'est d'être assez compactes pour s'opposer au passage d'un grand nombre de corps dissous. Tandis que les *membranes ordinaires* permettent la diffusion facile, l'exosmose (diosmose, dialyse) d'un grand nombre de corps (cristalloïdes) arrêtant plus ou moins complètement les colloïdes seulement, les membranes de précipité rendent la diosmose difficile à la plupart des corps (cristalloïdes et colloïdes).

Le précipité qui prend cette forme membraneuse est lui-même une substance colloïde, ou une substance cristalloïde. En tout cas sa structure est amorphe. On ne connaît pas (tout au moins jusqu'ici) de membrane de précipité qui ait une structure cristalline. C'est une question de fait. Il faut cependant noter que quelques-unes de ces membranes exercent une action sur la lumière polarisée (membrane de tannate de gélatine).

Les deux conditions de la formation de ces membranes de précipité sont les suivantes : 1° le précipité doit être amorphe ; 2° le précipité membraneux, formé au contact des deux solutions, doit être imperméable à chacune des substances dissoutes, A et B. Si la substance A pouvait traverser en effet le premier dépôt membraneux pour se répandre dans B, ou réciproquement, il se ferait des précipitations nouvelles, en fusée, de part et d'autre de la membrane. Il n'y aurait plus de membrane ou celle-ci serait bientôt détruite. C'est ce qui arrive, par exemple, lorsque l'on verse avec précaution une solution à 3 p. 100 de chromate de potassium dans une solution à 3 p. 100 d'acétate de plomb. Il se produit au contact des deux liquides une membrane de précipité (chromate de plomb amorphe). Mais cette membrane n'est pas absolument imperméable au chromate de potassium ; celui-ci diffuse dans l'acétate ; il se forme un trouble, puis un précipité : la membrane se brise.

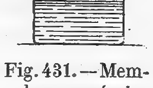


Fig. 431. — Membrane précaire (chromate de plomb).

Il faut noter une seconde circonstance qui montre bien que ces membranes ne sont pas absolument imperméables aux composants qui les forment (Voy. n° ***41***). La plupart sont, en effet, susceptibles d'épaississement si on les laisse au contact des corps dont la réaction les a engendrées (membrano-

(1) Traube, *Centralblatt für medicin. Wissensch.*, 1865. — *Experimente zur Theorie der Zellenbildung und Endosmose* (*Archiv für An. und Phys.*, 1867, p. 87). — *Botan. Zeitung*, 1875, p. 56.

gènes). Cet épaississement n'est possible que si les particules des deux corps peuvent venir en contact dans l'épaisseur même de la membrane. Celle-ci est donc pénétrable aux deux substances membranogènes. Ajoutons, ce qui a un intérêt pour la biologie, que cette manière de s'épaissir fournit un exemple remarquable d'*accroissement par intussusception* par contraste avec l'*accroissement par apposition*.

C'est avec ces réserves qu'il faut admettre les deux caractères fondamentaux des membranes de précipité, et qu'il est permis de dire que ces membranes sont formées d'une substance amorphe, constituée de manière à s'opposer au passage (diosmose) des deux substances composantes (membranogènes). Lorsqu'on ajoute que cette impossibilité au passage tient à l'étroitesse des interstices ou pores capillaires ou moléculaires, on emploie une image dont la réalité est très discutable (Voy. n° **42**, 1°).

31. Membranes de précipité en cloisons, en cellules de Traube. — Traube obtenait ses membranes en mettant en contact les deux solutions qui engendrent le précipité, dans un tube étroit. Celui-ci, contenant la solution la moins dense, était immergé dans la plus dense ; à la surface de séparation se déposait la membrane ; elle cloisonnait le tube.

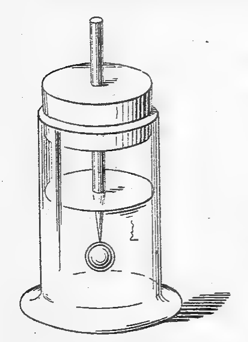


Fig. 432. — Formation d'une cellule de Traube.

Les cellules de Traube étaient formées en laissant tomber une goutte d'une solution dans l'autre. Par exemple, il employait une baguette de verre terminée en pointe ou un tube effilé. On les trempait dans une solution de colle (colle à bouche du commerce additionnée d'un peu de gélatine et colorée par l'indigo-carmin ou le bleu d'aniline, ou encore colle gélatinée du commerce additionnée de 10 p. 100 de sucre environ). On plongeait la pointe avec la goutte qu'elle retient dans une solution de tannin à 2 p. 100. Il se forme à la surface de la goutte une membrane transparente de *tannate de gélatine* qui maintient à son intérieur la colle colorée. Cette membrane imperméable à la colle, à la matière colorante, au tannin, laisse pénétrer de l'eau. Elle s'étend ainsi par élasticité ; elle peut grandir sans éclater si la pénétration n'est pas trop rapide. Aussitôt, en effet, que la distension permet en quelque point aux deux solutions opposées de venir en contact, un nouveau dépôt vient combler l'interstice (exemple d'accroissement par intussusception). Si l'on plonge les cellules ainsi formées dans l'eau pure, le développement est rapide et la cellule éclate.

On peut obtenir de la même façon des cellules de ferrocyanure de cuivre en aspirant dans un tube une solution de sulfate de cuivre et en l'immergeant ensuite dans le ferrocyanure de potassium en solution de 2 p. 100 à 5 p. 100. Ces cellules ne sont pas très extensibles : elles éclatent bientôt en un point, par où la solution intérieure s'épanche ; une nouvelle membrane se forme sur cette saillie. On obtient ainsi des figures remarquables analogues aux *arbres métalliques* des anciens chimistes. (S. Leduc)

32. Membranes de ferrocyanure de cuivre. Autres membranes (bleu de Prusse, phosphate de chaux). — Le type des membranes semiperméables est offert par la membrane de ferrocyanure de cuivre $FeCy^6Cu^2$, C'est celle-là qui a été la plus employée et qui a servi à Pfeffer pour la construction de son osmomètre.

On l'obtient en mettant en rapport une solution de sulfate de cuivre à 3 p. 100 So^4Cu avec une solution à 3 p. 100 de ferrocyanure de potassium $FeCy^6K^4$. On sait que le ferrocyanure de cuivre ne forme pas un précipité véritable; il constitue une sorte de matière colloïdale qui reste en suspension dans la liqueur et la colore en brun; cette matière ne se dépose qu'à la longue au fond des tubes à essais. Lorsqu'on opère en solution concentrée, le ferrocyanure se dépose à l'état de gelée incolore qui ne prend que par absorption ultérieure d'eau la couleur brune habituelle. C'est donc une substance qui, comme tous les colloïdes d'ailleurs, fixe des quantités d'eau plus ou moins grandes. Préparé, comme on l'a dit, par la réaction du ferrocyanure sur le sulfate de cuivre, ce corps entraîne toujours un peu d'alcali. Il retient une certaine quantité d'eau lâchement fixée qu'il perd lorsqu'on le chauffe. A 100°, il retient encore 7 équivalents d'eau (Rammelsberg).

Pfeffer a préparé aussi des membranes de bleu de Prusse, de phosphate de chaux, de phosphate de fer, d'hydrate d'oxyde de fer, qui ont servi pour des osmomètres.

Il préparait la membrane du bleu de Prusse Fe^7Cy^{18} en mettant en rapport la solution de ferrocyanure de potassium $FeCy^6K^4$ avec une solution à 1,5 p. 100 de chlorure de fer Fe^2Cl^6.

La membrane de phosphate de chaux s'obtenait en traitant une solution à 6 p. 100 de phosphate disodique $PO^4Na^2H + 12H^2O$ additionnée d'une petite quantité de carbonate de soude CO^3NaH par la solution à 3 p. 100 de chlorure de calcium $CaCl^2$.

Si l'on voulait construire des osmomètres pour l'étude de liqueurs alcalines, il faudrait renoncer aux membranes de ferrocyanure de cuivre ou de bleu de Prusse, qui sont détruites par les alcalis. On aurait recours alors aux membranes de phosphate de fer ou d'hydrate d'oxyde de fer, ou à la membrane de phosphate de chaux. Plus tard, la liste de ces membranes s'est considérablement augmentée (Voy. n° ***41***).

33. Osmomètres de démonstration. — On peut au moyen de ces membranes construire des osmomètres très simples, à la condition de donner un support à leur fragilité. Ces soutiens peuvent être des cloisons de tissu de toile, de soie, ou, mieux, de vessie de porc, de papier-parchemin, etc., perméables aux solutions que l'on veut étudier.

Fig. 433. — Osmomètre de démonstration.

Par exemple, à l'extrémité d'un tube de 20 à 25 millimètres de diamètre, le papier-parchemin est fixé au moyen de cire délayée dans l'alcool, puis lié fortement. La cloison de papier est imprégnée d'eau, puis le tube est plongé dans la solution de sulfate de cuivre à 3 p. 100, tandis qu'à l'intérieur l'on verse la solution de

ferrocyanure de potassium. La membrane de précipité de ferrocyanure de cuivre se forme dans l'épaisseur ou à la surface interne du papier-parchemin.

Les osmomètres de ce genre se prêtent à des expériences de démonstration des phénomènes osmotiques, et même de mesure jusqu'à 1/2 ou 3/4 d'atmosphère ; mais ils ne résistent pas à de fortes pressions ; la membrane se rompt.

Pfeffer a rappelé que Kürschner en 1842, Brücke en 1843 et Ludwig en 1849, avaient constitué accidentellement des membranes de ce genre, dans un dessein différent. Plus anciennement encore, les membranes de précipité jouaient certainement un rôle dans la formation des arborisations métalliques réalisées par les alchimistes.

34. *Osmomètre de Pfeffer. Principe de sa construction.* — Pfeffer a fait servir ces membranes de précipité, particulièrement la membrane de ferrocyanure de cuivre, à la construction d'un osmomètre modèle qui a permis les mesures les plus étendues et les plus précises de la pression osmotique.

Il a donné comme support, à la membrane de précipité, les parois d'un vase en argile blanche, tels qu'on les emploie pour servir de diaphragme dans les piles à deux liquides de Daniell, de Bunsen, etc. Ces vases sont facilement perméables à l'eau et aux solutions salines. La membrane de précipité est déposée, soit à la surface interne du vase de pile, soit dans l'épaisseur même de la paroi. On en provoque la formation en plongeant ce vase convenablement préparé dans la solution de sulfate de cuivre, tandis que l'on verse à l'intérieur la solution de ferrocyanure de potassium à 3 p. 100. Suivant qu'il s'écoule plus ou moins de temps entre les deux opérations, la solution de sulfate de cuivre a pénétré plus ou moins l'épaisseur du vase avant de venir au contact du ferrocyanure ; la rencontre des deux solutions s'effectue donc plus ou moins près de la surface intérieure du vase. Cette rencontre donne lieu à la formation de la membrane de précipité. Si l'on vient à faire une coupe dans la paroi, la membrane se montre comme une mince ligne, concentrique aux bords, tranchant par sa couleur brune sur la masse restée blanche. Le vase, ainsi préparé, constitue la partie essentielle de l'osmomètre. Il reste à le remplir de la solution que l'on veut étudier, et à le plonger dans l'eau après l'avoir muni d'un tube manométrique qui permettra de lire les niveaux d'ascension de l'eau introduite par endosmose.

35. *Détails de la préparation de l'osmomètre.* — Le succès de l'opération tenant à des conditions assez délicates, il est utile d'entrer dans quelques détails. Ces indications sont relatives au choix des vases poreux ; à leur nettoyage ; à la préparation de la membrane de précipité, différente suivant qu'elle doit être placée dans l'épaisseur ou à la surface intérieure du vase poreux ; à l'ajustage du tube manométrique ; à la vérification de l'appareil ; aux moyens d'assurer automatiquement sa conservation ou sa réparation ; à la régénération du vase de pile.

1° *Choix des vases poreux.* — Pfeffer employait des vases de pile de 46 millimètres de hauteur, de 16 millimètres de diamètre, de $1^{mm},2$ à 2 millimètres d'épaisseur. Il faut que les vases soient d'une pâte fine et homogène.

Tous ceux que l'on trouve dans le commerce ne conviennent pas. La réussite est mieux assurée quand on cherche à déposer la membrane de précipité à la surface interne du vase poreux plutôt que dans l'épaisseur de la paroi. Pfeffer a trouvé, dans deux fabriques seulement, des vases de pile convenant à ce dernier cas.

2° *Nettoyage des vases et formation de la membrane osmotique.* — Les vases doivent être nettoyés avec soin. Pour enlever les terres et le fer qui les souillent, on les lave avec des alcalis étendus, puis à l'acide chlorhydrique à 3 p. 100 ; on les rince, on les sèche ; puis on les munit du tube manométrique. Au moment de s'en servir, on les imbibe d'eau, en épuisant l'air par le vide répété : la présence d'une bulle d'air empêcherait le contact des deux liquides en un point et nuirait ainsi à la régularité de la membrane de précipité. On laisse le vase, pendant quelques heures, immergé dans une solution de sulfate de cuivre à 3 p. 100, qu'on a eu soin de verser aussi à l'intérieur ; on le rince rapidement à plusieurs eaux, ce qui lave les surfaces et laisse l'épaisseur imbibée de sulfate : on l'essuie au papier-filtre, intus et extra : aussitôt que l'humidité reparaît sur la surface essuyée, on verse à l'intérieur la solution de cyanoferrure à 3 p. 100 et on plonge, sans tarder, dans la solution de sulfate de cuivre ; on l'y laisse trente-six à quarante-huit heures. Le vase est prêt pour l'expérience. La membrane de cyanoferrure de cuivre s'est formée sur la surface intérieure ; elle y est exactement appliquée et en suit toutes les inflexions et les inégalités. En procédant ainsi, Pfeffer réussissait 19 fois sur 20.

Si l'on veut que la membrane de précipité se forme dans l'épaisseur du vase, la manipulation sera plus simple ; mais, comme nous l'avons dit, le succès sera moins certain. On supprimera, dans les manœuvres précédentes, l'immersion préalable dans le sulfate de cuivre, suivie de rinçage, d'essuyage et de séchage partiel à l'air. Le vase de pile imbibé d'eau sera plongé dans la solution de sulfate de cuivre à 3 p. 100, et quelque temps après, environ un quart d'heure ou vingt minutes, on versera à l'intérieur la solution de ferrocyanure. La rencontre des deux solutions, la membrane, par conséquent, se fera alors à quelque distance des surfaces.

3° *Tube manométrique.* — Nous avons dit qu'avant de procéder à la préparation de la membrane on devait munir le vase de pile de son tube manométrique.

On peut employer deux espèces de manomètres : un tube manométrique simple, ou un manomètre mercuriel à air comprimé. Le premier convient au cas où l'on étudie des solutions qui développent une faible pression osmotique ; l'autre convient aux mesures des hautes pressions.

Dans l'un et l'autre cas, la disposition essentielle est la même ; un tube de verre V qui a presque le diamètre du vase d'argile lui est relié et scellé par de la cire. Dans ce tube d'union se trouve, d'autre part, scellé de la même manière un tube à deux tubulures T. Dans le cas où il s'agit de faibles pressions osmotiques, la tubulure verticale porte un tube étroit S ($1^{mm},4$ de diamètre intérieur) fixé au moyen d'un bouchon de caoutchouc (fig. 435) ; la tubulure latérale L est fermée par un bouchon.

Dans le cas des hautes pressions osmotiques, le tube à mercure M est fixé

à la tubulure latérale, et la tubulure verticale porte un tube *g* G qui sert au remplissage de l'osmomètre. On le ferme à la flamme après cette opération (fig. 434).

Il y a intérêt à réduire toujours au minimum la capacité des parties accessoires ; tubes manométriques et pièces de jonction doivent être aussi étroits que le permet la solidité et la bonne disposition de l'appareil.

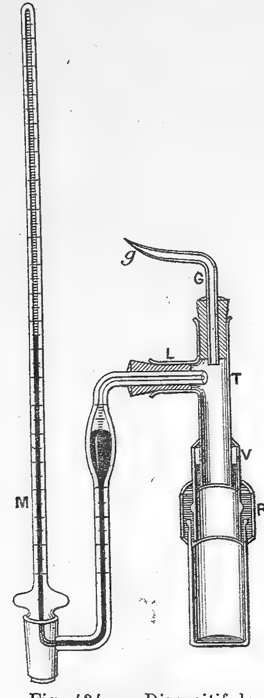


Fig. 434. — Dispositif de Pfeffer.

Enfin l'ajustage peut être renforcé par un anneau R à l'intérieur duquel on coule du mastic à la litharge. Cet anneau de renforcement est utile surtout dans le cas où l'on opère à des températures assez élevées pour avoir à craindre le ramollissement de la cire.

4° *Vérification.* — L'appareil ainsi disposé et la membrane de précipité y étant ensuite formée, on l'essaie. Il faut s'assurer que la membrane est bien continue, sans lacune ou fissure. Pour cela, on remplit l'appareil d'une solution renfermant en poids 3 p. 100 de ferrocyanure de potassium et 1,5 p. 100 d'azotate de potasse. Cette solution est capable de développer une pression osmotique de trois atmosphères. Lorsque le vase, ainsi rempli, sera placé dans l'eau, la pression devra monter lentement et d'une manière soutenue. S'il y avait fuite ou déchirure, on verrait, après une ascension plus ou moins rapide, une chute brusque ou lente.

5° *Précaution contre la rupture de la cloison osmotique.* — On a remarqué que lorsque l'on prolonge la durée du contact des solutions formatrices de la membrane (des membranogènes, selon l'expression de Pfeffer), celle-ci s'épaissit lentement. Dans un cas où le vase d'argile était resté cinq semaines rempli de ferrocyanure et plongé dans le sulfate de cuivre, la membrane avait doublé d'épaisseur. Cette remarque a été utilisée pour assurer l'appareil contre les risques de rupture. Il suffit de laisser, de part et d'autre de la membrane, des solutions de ferrocyanure et de sulfate. S'il se produit la moindre fissure, les deux solutions venant au contact, la brèche sera aussitôt comblée. La réparation se fait automatiquement.

Il faut évidemment que cette mesure de sauvegarde n'ait pas d'influence sur les phénomènes que l'on veut observer. Pour cela, les solutions de membranogènes maintenues intus et extra doivent être isosmotiques. Par exemple, on emploiera une solution de ferrocyanure de potassium à 0,1 p. 100 en poids et une solution de sulfate de cuivre à 0,09 p. 100 : l'une sera ajoutée au liquide intérieur, l'autre placée dans le vase extérieur à eau ; ou, pour parler plus exactement, on ajoutera au liquide intérieur une quantité de ferrocyanure telle, qu'après cette addition, la liqueur contienne 1 de ferro-

cyanure pour 99 d'eau, en poids; dans le vase extérieur, on emploiera, au lieu d'eau, une solution contenant 99,91 d'eau pour 0,09 de sulfate de cuivre. S'il n'y a pas de réaction entre le ferrocyanure et la substance que l'on veut étudier osmotiquement, l'addition dont nous parlons ne changera rien aux résultats. Pfeffer s'en est assuré directement.

Il a mesuré par exemple la pression osmotique développée par une solution de sucre à 1 p. 100, avec ou sans addition de ferrocyanure. Avec le ferrocyanure, il a trouvé $49^{cm},8$ en hauteur de mercure : sans ferrocyanure, 48,9. Avec une solution de gomme à 18 p. 100 en poids, de densité 1,072, il a encore trouvé des valeurs concordantes : 118 centimètres de mercure et $120^{cm},4$ sans ferrocyanure, 118,9 et 119,7 avec ferrocyanure.

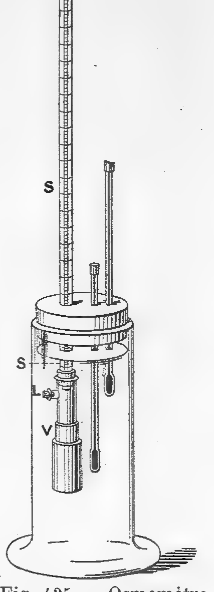


Fig. 435. — Osmomètre pour les faibles pressions.

En résumé, pour assurer la conservation de la cloison osmotique et, au besoin, sa réparation, on peut opérer en laissant de chaque côté de la membrane les substances membranogènes qui la forment, en outre de celles que l'on veut étudier. Ceci, bien entendu, à la condition que ces substances soient employées en solution convenable ayant même pouvoir osmotique, et qu'elles n'exercent pas d'action sur les solutions à l'étude.

6° *Cloisons osmotiques diverses.* — Ce qui vient d'être dit sur la manière de préparer, de vérifier, de conserver la cloison osmotique de ferrocyanure de cuivre s'applique aux autres membranes.

La membrane de bleu de Prusse (Fe^7Cy^{18}) se prépare en plongeant le vase de pile dans la solution de chlorure de fer (Fe^2Cl^6) à 1,5 p. 100, et en versant à l'intérieur la solution de ferrocyanure de potassium à 3 p. 100. Les solutions isosmotiques pour la réparation de la cloison ont la composition suivante : chlorure de fer anhydre 0,025 p. 100; ferrocyanure 0,1 p. 100.

La membrane de phosphate de chaux se prépare au moyen de la solution de chlorure de calcium ($CaCl^2$) à 3 p. 100 et de la solution de phosphate disodique ($PO^4Na^2H + 12H^2O$) à 6 p. 100, additionnée d'une petite quantité de bicarbonate de soude (CO^3NaH).

7° *Régénération.* — Lorsqu'on a rencontré un vase de terre poreuse réalisant les conditions convenables, il y a intérêt à le conserver et à le faire servir plusieurs fois. Il est possible de l'utiliser alors même qu'un accident irréparable serait survenu à la membrane osmotique. On démontera l'osmomètre; il faudra enlever mécaniquement le mastic de plomb du tube de renforcement et achever de le faire disparaître au moyen de l'acide azotique : dissoudre la cire au moyen de l'alcool; se débarrasser de la membrane de ferrocyanure de cuivre par la lessive de soude étendue à laquelle on ajoutera du sel de Seignette pour dissoudre l'oxyde de cuivre; laver enfin avec l'acide chlorhydrique étendu.

36. Mesures osmométriques. Précautions nécessaires. Invariabilité de la température. — Cet appareil se prête à trois espèces de mesures, correspondant aux trois aspects du phénomène osmotique. Il y a pénétration dans l'osmomètre de l'eau extérieure appelée plus ou moins énergiquement selon la substance en solution ; il peut y avoir mouvement inverse de l'eau qui filtrera du dedans au dehors au travers de la membrane si l'on exerce à l'intérieur une pression suffisante ; on peut enfin étudier l'équilibre entre ces deux actions contraires, et déterminer la pression contre-balancée, correspondant à la fixité du niveau dans le tube manométrique ; celle-ci constitue précisément la pression ou *force osmotique*. On peut, en modifiant très légèrement la disposition de l'appareil, procéder à l'une ou l'autre de ces déterminations : courant endosmotique, filtration, et surtout pression osmotique répondant à l'équilibre naturel.

Il y a à observer des précautions opératoires qui sont les mêmes dans tous les cas. La plus essentielle est d'opérer à température invariable. Il y a pour cela deux raisons. La première c'est que l'osmomètre constitue une sorte de thermomètre à gros réservoir : un changement de température de 1° détermine une variation de niveau de plus de 2 millimètres dans le tube manométrique. La sécurité des mesures exigerait donc le maintien d'une température invariable, alors même que l'instrument seul serait en cause. Mais il y a une seconde raison : c'est que la température exerce une action très appréciable sur le phénomène de l'osmose, ainsi que Dutrochet l'avait parfaitement aperçu. De là, la nécessité d'assurer la constance et l'uniformité de la température pendant l'opération. Pfeffer obtenait ce résultat en plongeant l'appareil tout entier dans un vase plein d'eau dont on uniformise la température par des moyens convenables.

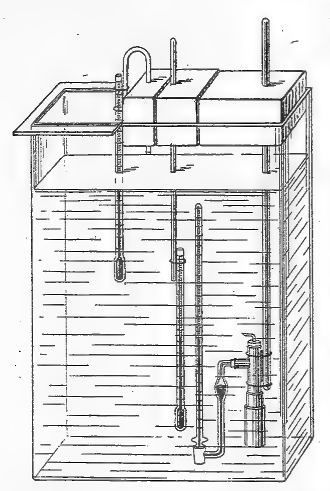


Fig. 436. — Osmomètre de Pfeffer.

Disons enfin que la mesure de la dénivellation qui fournit la valeur de la pression osmotique se fait avec toutes les précautions usitées par les physiciens : emploi du cathétomètre, corrections relatives au ménisque, aux variations de calibre du tube manométrique à air comprimé, appréciation de la valeur limite de la somme des erreurs possibles.

37. Modifications ultérieures de l'appareil de Pfeffer. — Les auteurs postérieurs à Pfeffer ont apporté des modifications plus ou moins importantes à son appareil et à sa méthode de mesure.

α. Appareil de Tammann. — Tammann (1), en 1892, a proposé de prendre, pour former la membrane, des solutions plus concentrées que celles de

(1) Tammann, Zur Messung osmotischen Drucke (*Zeitschrift für physik. Chemie*, IX, 1892, p. 97-108).

Pfeffer; à savoir, pour le ferrocyanure de potassium une solution contenant 0,33 molécule-gramme par litre; et, pour le sulfate de cuivre, une solution contenant 1 molécule-gramme par litre.

L'appareil et le procédé de mesure diffèrent également. On cherche à contre-balancer la pression osmotique, de manière qu'il n'y ait pas de mouvement de l'eau d'un côté ni de l'autre de la membrane, ce dont on s'assure en constatant que le volume du vase intérieur de l'osmomètre n'a pas varié. On équilibre la pression osmotique au moyen d'un manomètre mobile, analogue à celui qui existe dans la pompe à mercure qui sert à l'analyse des gaz. C'est un réservoir G plein de mercure, relié par un tube de caoutchouc au récipient C qui doit contenir la solution vers laquelle se fait le mouvement endosmotique. En élevant ou abaissant le réservoir, on fait varier la pression dans le récipient. Cette pression se mesure d'ailleurs au moyen d'un tube manométrique F, branché latéralement sur le récipient.

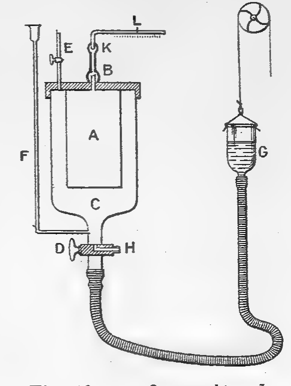


Fig. 437. — Osmomètre de Tammann.

Le vase intérieur qui contient l'eau pure est constitué par une bougie Chamberland, A, de 80 centimètres cubes de capacité, avec son couvercle B auquel est adapté un tube capillaire L, disposé horizontalement, et divisé en un certain nombre de divisions. Chaque division correspondait à un volume de 0,15 centimètres cubes. Ce vase A constitue, en fait, une sorte de gros thermomètre, très sensible aux variations de température (1 variation de 1/50 de degré produit un déplacement d'une division). Il faut donc des précautions particulières pour écarter les causes d'erreurs de ce genre.

En réalité, au lieu d'eau pure dans le vase A et de sulfate dans le vase C, on peut, au début, placer dans ces récipients des solutions isosmotiques des membranogènes (n° **35**, 5°) : sulfate de cuivre en C, ferrocyanure de potassium en A. Pour provoquer l'osmose, ensuite, il suffira d'augmenter la quantité de sulfate du vase C.

Type d'expérience. — Imaginons maintenant une opération dans laquelle il y aurait en C une solution, non compensée, de sulfate de cuivre à 0,91 molécule-gramme, soit 144^{gr},9, par litre. L'eau tend à passer du vase A dans C et par conséquent le volume de A tend à diminuer. On exerce, en abaissant le réservoir G, une compression de 85 millimètres; ce n'est pas encore suffisant pour arrêter la baisse de volume de A : l'index se déplace encore vers la gauche de 4 divisions (0^{cc},60) par minute. On augmente la pression en élevant davantage le réservoir mercuriel. A 115 millimètres, l'équilibre est établi, l'index est revenu à son point initial et il y reste. La différence des pressions osmotiques dans les deux vases est donc mesurée par 115 millimètres. En appelant p_1 la pression osmotique (attraction pour l'eau) de la solution de sulfate de cuivre, et p celle de la solution du vase A, on a :

$$p_1 - p = 115. \qquad (1)$$

Si l'on veut avoir la pression osmotique d'une autre substance S, on l'ajoutera dans le vase C (à la condition qu'elle ne réagisse pas sur la solution de sulfate de cuivre). Par exemple, on aura, après cette addition, dans le vase C une solution qui, dans un litre de la solution primitive de sulfate de cuivre, contiendrait 0,00355 gramme-molécule de la substance S. On verra le volume de A diminuer, et pour le maintenir constant et ramener l'index à son point de départ on constatera qu'il faut exercer une pression de 238 millimètres. A ce moment, la pression osmotique dans le vase C (pression osmotique de la solution de sulfate de cuivre p_1 + de la substance S, p_2) et la pression osmotique du vase A, auront précisément pour différence la pression 238 millimètres qui ramène l'équilibre.

On aura :

$$p_1 + p_2 - p = 238. \qquad (2)$$

La différence de (2) et (1) donnera :

$$p_2 = 238 - 115 = 123^{mm}.$$

Ce sera la pression osmotique cherchée de la solution S, contenant 0,00355 molécule-gramme de cette substance par litre.

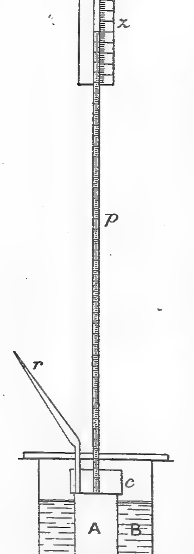


Fig. 438. — Osmomètre de Ponsot.

β. Appareil et méthode de Ponsot. — M. Ponsot (1), en employant le procédé de Pfeffer modifié, a préparé des vases de pile à membrane hémiperméable de ferrocyanure de cuivre, pouvant résister à des pressions considérables (5 atm., 17 atm.).

La méthode employée permet de faire les mesures avec une grande précision.

La solution (sucre par exemple) est placée dans le vase a paroi semiperméable A (cellule osmométrique) qui, lui-même, plonge dans l'eau pure B. Le bouchon C est fortement assujetti : il est traversé par deux tubes de verre, l'un r qui sert au remplissage et se termine par une pointe effilée que l'on peut fermer à la flamme ; l'autre verticale p portant une plaque z divisée en millimètres.

Au début, l'on pousse la solution par le tube r, de manière qu'elle remplisse la cellule osmométrique A et s'élève dans le tube p jusqu'au niveau z très voisin de celui qui correspond à l'équilibre. — Une expérience préliminaire ou un calcul approximatif ont fait connaître ce point d'équilibre.

L'appareil est placé dans une enceinte à température sensiblement constante (cave profonde de brasserie, fonds de puits du Laboratoire de la Sorbonne). On note toutes les vingt-quatre heures la position du niveau. On ajoute de la solution si le niveau s'est abaissé ; on en enlève s'il s'est élevé dans l'intervalle de deux observations successives.

(1) Ponsot, Recherches osmotiques sur les solutions très étendues de sucre de canne (*Comptes rendus de l'Ac. des Sc.*, t. CXXIII, p. 659 ; *ibid.*, 29 novembre 1897 et 12 juin 1899).

On obtient ainsi, par des tâtonnements, la position du niveau correspondant à l'équilibre osmotique, et, par conséquent, la pression osmotique évaluée en colonne de la solution sucrée.

On peut procéder d'une manière plus expéditive. On mesure à différentes hauteurs la *vitesse osmotique*, c'est-à-dire le déplacement du niveau dans un temps donné, et l'on détermine ainsi la hauteur de vitesse nulle ou d'équilibre osmotique.

Résultats :

a. *Solution sucrée.* — Avec une solution très étendue, contenant 0gr,6175 par litre à 11°,8, la hauteur osmotique corrigée a été de 873 millimètres, 870 millimètres; 869 millimètres, 867 millimètres; moyenne 870 millimètres. C'est précisément la valeur qui correspondrait au chiffre théorique calculé d'après l'hypothèse de Van t'Hoff.

L'auteur a conclu de ces expériences qu'il n'y avait pas de dissociation du sucre dans les solutions très étendues.

b. *Solution de* NaCl. — Avec une solution à 110 millimètres par litre, température 11°,8, hauteur mesurée 798 millimètres, hauteur calculée 907 millimètres — d'où coefficient de correction = 1,76 (Voy. nos ***85*** et ***86***).

Avant d'indiquer les résultats des expériences de Pfeffer et de ses successeurs, il ne sera pas inutile de résumer quelques points de doctrine relatifs à la constitution des membranes de précipité, — aux rapports de cette constitution avec le phénomène de l'osmose — aux propriétés de ces membranes et aux caractères qui les distinguent des membranes ordinaires.

38. Considérations théoriques sur la constitution de la membrane de précipité. — Nous avons parlé plus haut (n° ***20***) de la constitution des *membranes animales*, perméables, et de la conception que Naegeli s'en était formée (théorie micellaire). Pfeffer a développé, à propos des *membranes de précipité*, semiperméables, des idées analogues (théorie des tagmas). L'une et l'autre théorie, d'ailleurs, s'inspirent des vues très justes développées par l'inventeur de l'osmose, Dutrochet.

Les membranes de précipité, comme les membranes animales et la matière organique, en général, participeraient de la constitution des substances colloïdes. Comme celles-ci, elles peuvent absorber de l'eau et se gonfler sous l'action de ce liquide. Leur substance, quoique minérale, peut retenir l'eau à divers degrés de fixation et présenter même l'espèce de cohésion particulière aux corps gélatineux, colloïdes, susceptibles de gonflement. Il en est ainsi pour le ferrocyanure de cuivre. Chauffé à 100°, il retient encore 7 équivalents d'eau (Rammelsberg) ; mais avant d'arriver à ce point, il en abandonne une certaine quantité qu'il avait fortement fixée. La même chose est vraie pour le bleu de Prusse, pour le phosphate de fer, pour l'hydrate colloïde de peroxyde de fer. Ces corps ont surtout le caractère des colloïdes, par opposition aux cristalloïdes, en ce qu'ils diffusent difficilement dans les liquides que l'on met en contact avec eux et qu'ils ne traversent pas (ou traversent difficilement) les membranes ordinaires, les membranes des dialy-

seurs (papier-parchemin). L'hydrate colloïde de fer ne passe pas au travers des membranes que les sels de fer peuvent traverser facilement.

Ces propriétés s'expliquent si l'on suppose que ces corps sont formés de petites masses qui retiennent de l'eau. Leurs particules physiques ultimes seraient donc des agrégats de matière et d'eau : c'est ce que Naegeli appelait des *micelles* et ce que Pfeffer nomme des *tagmas*. Ces agrégats constituent les grosses pierres de l'édifice moléculaire. On comprend que ces gros matériaux ne puissent traverser les cribles fins, tels que le papier-parchemin et les membranes animales, ni s'insinuer par diffusion entre les molécules des liquides. On pourrait donc, d'après cela, distinguer deux espèces de corps, quant à leur constitution physique ; le point de départ des uns et des autres est le même : c'est la molécule, terme ultime de la division physique et résultant de l'union des atomes régis par les forces chimiques. Il y aura une première catégorie de corps, solides ou liquides, formés de simples molécules isolées ou unies par la cohésion physique (*commolecelles*, *polymolecelles*) ; il y en aura une seconde dont le constituant élémentaire, au lieu d'être la molécule isolée ou unie à d'autres, est un agrégat plus complexe de molécules ; celui-ci, par surcroît, peut fixer de l'eau à divers degrés : c'est le *tagma*, la *micelle*. Quant à la forme de ces agrégats, tagmas ou micelles, les phénomènes de double réfraction que présentent certaines membranes colloïdes (tannate de gélatine) peuvent faire supposer qu'ils pourraient être polyédriques.

39. Rapport entre la constitution des membranes de précipité et le mouvement osmotique de l'eau. — Les membranes de précipité sont hémiperméables, en principe.

En fait, il faut opposer quelques réserves à la rigueur de cette assertion (nº *41*).

Elles permettent donc le passage de l'eau et de l'eau seulement. Ce cheminement de l'eau peut se concevoir de deux manières, par deux voies : l'une qui côtoie les tagmas, l'autre qui les pénètre.

On se le représentera de la manière la plus simple si l'on imagine la membrane réduite à une couche unique de tagmas. L'eau peut passer entre les tagmas, dans les intervalles qui les séparent. Ou bien, puisqu'il y a de l'eau dans les agrégats eux-mêmes, celle qui traverse peut avoir appartenu momentanément à ces tagmas, être entrée dans leur constitution et en être sortie ensuite. On pourrait comprendre ce mouvement de sortie si l'on imagine, en contact avec la membrane, du côté intérieur de l'osmomètre, une substance saline plus avide d'eau que le tagma lui-même. Le mouvement d'entrée serait la conséquence de l'attraction du tagma, qui tend à se reconstituer, pour l'eau libre qui l'entoure. Il y a, en résumé, une voie *diatagmatique* et une voie *amphitagmatique*.

Si l'on analyse davantage, on peut se rendre compte que le transit *diatagmatique* met en jeu, soit pour l'entrée, soit pour la sortie, les forces moléculaires qui s'exercent à l'intérieur de ces agrégats. C'est une *osmose moléculaire*.

Le transit *amphitagmatique* a lieu entre les particules tagmatiques T_1 T_2 dans les pores ou intervalles qui les séparent. Ces intervalles, ces

canalicules peuvent être plus ou moins larges (*ab*) et nous devons y distinguer deux zones : une zone périphérique, contiguë aux particules tagmatiques et dans leur sphère d'action moléculaire ($T_1\alpha$, $T_2\beta$) où l'eau est fixée plus ou moins fortement — et une zone centrale qui constitue un simple canal capillaire, en dehors de la sphère d'action moléculaire. — L'eau en mouvement, dans le phénomène d'osmose, peut appartenir à l'une et l'autre de ces zones. Dans le premier cas, l'attraction forte de la solution saline à l'intérieur de l'osmomètre (côté droit de la figure) peut l'enlever à la zone d'action moléculaire. C'est là encore un cas d'*osmose moléculaire*.

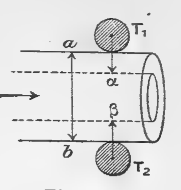


Fig. 439.

En second lieu, l'eau peut suivre le canal central et se répandre par diffusion progressive à son extrémité : c'est de l'*osmose capillaire* (1).

En résumé, on peut distinguer une osmose moléculaire et une osmose capillaire (2).

40. *Caractères distinctifs entre les membranes hémiperméables et les membranes ordinaires.* — Ces considérations amènent à concevoir quelle est la nature de la différence entre les membranes ordinaires et les membranes de précipité. Le fait que, chez ces dernières, la filtration est lente et que les solutions de sels, de cristalloïdes en général, ne les traversent pas, nous fait supposer que, chez elles, la partie libre des canaux qui existent entre les particules (canaux amphitagmatiques) est très restreinte. L'osmose capillaire doit être réduite à très peu de chose ou à rien. — Avec les membranes ordinaires, au contraire, la filtration est rapide (3), la diosmose (exosmose, dialyse) des solutions salines est facile ; l'osmose capillaire doit avoir un rôle considérable.

Au résumé, les membranes ordinaires permettent l'osmose moléculaire et l'osmose capillaire ; les membranes de précipité, l'osmose moléculaire seulement ou principalement.

De ces différences théoriques nous devons rapprocher les différences de

(1) Les physiciens ont distingué, dans les cas d'écoulement par tubes capillaires, les deux zones de la veine liquide : une zone périphérique d'eau fixée par l'attraction moléculaire des particules de la matière du tube, sorte de gaine immobile formant la paroi d'un canal où coule la veine centrale libre (Poiseuille, 1843 ; Wilhelmy, 1864). Cette gaine peut être mise en mouvement plus ou moins facilement par une force agissant parallèlement à l'axe du canal ; c'est le cas dans notre osmomètre. Cette gaine, où le mouvement de l'eau est plus ou moins entravé, a une faible épaisseur : c'est celle du rayon d'action des forces moléculaires. Il a été évalué par Plateau et Quincke à 55 millionièmes de millimètre ; des travaux plus récents ont estimé ce rayon d'action à 25 de ces unités environ, au lieu de 55.

(2) Brücke, en 1843, avait insisté sur l'osmose capillaire. Il avait appelé l'attention sur le liquide qui traverse les canalicules poreux et sur les différences de composition de cette veine dans sa partie centrale et dans sa partie périphérique. Plus tard, en 1855, Fick distingua l'osmose à travers les pores et l'osmose à travers la substance même de la membrane. Mais les théories de ces deux auteurs restèrent incomplètes.

(3) Pfeffer a comparé les capacités de filtration d'une vessie de porc et d'une membrane de ferrocyanure de cuivre dans les mêmes conditions de durée (1 heure), de pression (100 c. c. de mercure) et de surface (1 décim. carré). La portion la moins perméable de la vessie de porc a laissé écouler 8,87 centimètres cubes (d'autres parties 1 600 c. c.), alors que la membrane de précipité laissait écouler seulement 0,04 centimètres cubes ; le vase de pile, dans le même temps, laissait écouler de 950 à 1 800 centimètres cubes d'eau.

fait. Les membranes de précipité sont sensiblement homogènes ; il n'y a pas lieu de distinguer une face de l'autre. Au contraire, les membranes ordinaires sont différentes quant à leurs faces : l'osmose ne se fait pas de la même manière suivant qu'on a tourné une face ou l'autre vers l'intérieur de l'osmomètre (Matteucci et Cima).

Les membranes de ferrocyanure de cuivre sont très extensibles. Elles le sont autant que le caoutchouc mince. Lorsque l'on fait déposer la couche de ferrocyanure sur un tissu comme la toile ou la soie, on voit, sous l'influence de la pression, la membrane pousser à travers les mailles du tissu une multitude de saillies en cul-de-sac, semblables à des villosités. Tammann a constaté qu'une pression de 1 millimètre de mercure produit déjà une extension appréciable.

41. Les membranes de précipité ne possèdent qu'une hémiperméabilité relative. — a. *Expériences de Pfeffer.* — b. *De Tammann.* — c. *De Meerburg.* — d. *De Walden.* — e. *Conclusions.*

a. Expériences de Pfeffer. — Pfeffer s'est assuré que la membrane de ferrocyanure de cuivre est absolument imperméable pour la gomme et pour la dextrine. Elle n'en laisse point passer de traces. Il en est de même avec les solutions de sucre de canne au-dessous de la concentration 5 p. 100 ; avec des solutions à 10 p. 100 et au-dessus, il y a une petite quantité qui passe. Cette même membrane est perméable à l'acide chlorhydrique étendu : elle est légèrement perméable au chlorate de potassium et au nitrate de potassium.

Cette question de savoir si la membrane de ferrocyanure de cuivre est réellement hémiperméable, c'est-à-dire perméable à l'eau et imperméable aux autres corps, présente une grande importance au point de vue théorique. Elle s'est posée, un peu plus tard, lorsque l'on constata des différences entre les pressions osmotiques des solutions salines et les pressions calculées d'après la théorie ; on pensa que ces anomalies inattendues pouvaient être dues à la diosmose possible de solutions considérées à tort comme indialysables. Cette supposition fut confirmée par l'expérience.

b. Expériences de Tammann. — Tammann (1892) (*loc. cit.*) opéra avec une membrane de ferrocyanure de cuivre déposée sur la lame de parchemin d'un dialyseur ordinaire, cylindrique, à fond plat. Le diamètre de la membrane était de 10^{c},5. On plaçait à l'intérieur 50 centimètres cubes de la solution : le vase extérieur contenait 80 centimètres cubes d'eau distillée : l'opération durait dix minutes : après quoi, l'on recherchait la quantité du sel qui avait diosmosé dans l'eau.

Voici les résultats :

	Quantité de sel dans 100 gr. de la solution placée dans le dialyseur.	Quantité de sel dialysé.
Azotate de potassium........................	0^{gr},80	0^{gr},023
—	1^{gr},43	0^{gr},041
—	3^{gr},30	0^{gr},094
Sulfate de sodium Na^2SO^4........	1^{gr},00	0^{gr},012
Sulfate de potassium K^2SO^4........	1^{gr},00	0^{gr},010
Sel de Seignette........................	0^{gr},94	0^{gr},006

La membrane est donc perméable à ces différents sels.

Tammann a montré de plus que cette perméabilité, ainsi mesurée, était précisément ce qu'il fallait qu'elle fût pour rendre compte des anomalies observées.

Tammann (1) a repris l'étude de cette question de la perméabilité des membranes, d'une autre manière encore. Il a constaté que les membranes de ferrocyanure de cuivre, de ferrocyanure de zinc et de gélatine tannique, présentaient une perméabilité pour certaines matières colorantes. Les membranes étaient préparées de la manière suivante :

Pour la membrane de ferrocyanure de cuivre : Dans un tube à essai bien nettoyé on verse une solution de sulfate de cuivre à 0,05 gramme-molécule par litre ; puis, avec lenteur et précaution, on verse une solution de ferrocyanure de potassium à 0,05 gramme-molécule — soit 7gr,96 — par litre, contenant une petite quantité de la matière colorante. La membrane se forme à la surface de contact des deux liquides. On observe si la coloration s'étend au-dessous. — La membrane de ferrocyanure de zinc se prépare de la même manière avec le sulfate de zinc et le ferrocyanure de potassium. — La membrane de gélatine tannique s'obtient en versant la solution de tannin à 1 p. 100 dans la solution de gélatine à 1 p. 100. Les substances colorantes employées ont été très nombreuses : d'abord des sels de bases colorées (chlorure de fuchsine, de safranine, de méthylviolet, picrate d'aniline, oxalate de vert brillant ; en second lieu, des sels de soude, méthylorange, oranger, érythrosine, tournesol bleu, etc. ; enfin des colorants acides, éosine et méthyléosine.

Voici les résultats :

D'abord, toutes les membranes se sont montrées perméables aux colorants acides. En outre, la membrane de ferrocyanure de cuivre s'est montrée perméable pour le chlorure de fuchsine, pour le chlorure de diamant-fuchsine, pour le ponceau 3R, soit en tout 5 fois sur 17 essais. Celle de ferrocyanure de zinc, 7 fois sur 17 ; celle de gélatine tannique, 11 fois.

Le phénomène du passage de ces matières colorantes se produit en deux temps, ainsi qu'il résulte des observations de Meerburg (2). Dans le premier temps, le colorant imprègne la membrane et s'y dépose au moment même de sa formation ; il s'y dissout en quelque sorte, s'y fixe. Ce n'est déjà plus la membrane pure de ferrocyanure ; c'est une membrane modifiée par le colorant et rendue ainsi perméable à la solution de ce colorant. Cette perméabilité se manifeste dans le second temps de l'opération : c'est elle que Tammann a observée.

c. EXPÉRIENCES DE MEERBURG. — Meerburg procède autrement ; il n'introduit le colorant dans l'appareil que lorsque la membrane est déjà formée. Alors, le résultat est différent. La membrane pure de ferrocyanure est imperméable au chlorure de fuchsine, au chlorure de diamant-fuchsine, au ponceau 3R. A la longue, cependant, la membrane absorbe le corps coloré et alors seulement elle devient perméable. Ce dernier fait est important pour la théorie, comme on le verra tout à l'heure.

d. EXPÉRIENCES DE WALDEN (3). — Cette question de la perméabilité des membranes a donné lieu, enfin, à un travail très étendu de Walden.

(1) TAMMANN, Ueber die Permeabilität der Niederschlags-Membranen (*Zeitschrift für physik. Chem.*, X, 1892, p. 255-264).

(2) MEERBURG, Zur Abhandlung Tammanns : Ueber die Permeabilität der Niederschlags membranen (*Ibid.*, XI, 1893, p. 446).

(3) WALDEN, Ueber Diffusionserscheinungen an Niederschlags membranen (*Ibid.*, X, 1892, p. 699).

La particularité de ces expériences réside en ceci, que l'auteur a donné pour support à la membrane de précipité une autre membrane de gélatine insolubilisée. Il plonge un tube de verre de 5 centimètres de long et 1 centimètre de diamètre, tenu bouché d'un côté avec le doigt, dans une solution chaude de gélatine chromatée ayant la composition suivante : gélatine, 10 grammes ; eau, 50 grammes ; chromate d'ammoniaque, 1 gramme. Le tube retiré, débarrassé de la masse formant goutte, présente alors à son extrémité un diaphragme mince de gélatine. Celle-ci, exposée à la lumière, devient insoluble.

On dépose ensuite à l'intérieur de cette cloison la membrane de ferrocyanure de cuivre en opérant comme Pfeffer avec le sulfate de cuivre et le ferrocyanure de potassium.

Walden a produit et étudié beaucoup d'autres membranes de précipité, par exemple des membranes de silicate de cobalt, de silicate de nickel ; de ferrocyanure de cobalt, de nickel, de zinc ; de cobalto-cyanures de cobalt, de nickel, de cadmium, de cuivre.

e. Conclusions. — Toutes ces études se résument à dire que les membranes de précipité sont perméables à un grand nombre de corps. La membrane de ferrocyanure est traversée par les acides succinique, tartrique, citrique, isobutyrique, tandis qu'elle ne l'est point par les sels de potasse de ces acides (Tammann). Elle est sensiblement perméable aux chlorures, bromures, nitrates de potassium, ammonium, sodium, lithium et baryum, aux chlorure et bromure de strontium. Elle est imperméable ou très peu perméable aux sulfates.

En général, les membranes de précipité sont traversables par tous les acides, puis par les sels d'acides monobasiques ; plus difficilement par les sels d'acides polybasiques. Il n'y a pas de distinction absolue entre les corps organiques et inorganiques, entre ceux qui sont dissociables par l'électricité (électrolytes) et ceux qui ne le sont pas (non électrolytes). Il y a beaucoup de cas où, de deux sels ayant le même poids atomique, ou le même nombre d'atomes dans leur molécule, l'un passe à travers la membrane, tandis que l'autre est arrêté.

42. ***Conséquences relatives à l'explication théorique de la diosmose.*** — Il est maintenant établi que l'imperméabilité des membranes de précipité n'est pas absolue. Un certain nombre de substances traversent ces membranes ; elles diosmosent, dialysent ; d'autres ne traversent pas, ne diosmosent pas. A quoi tient cette différence ? Quelle est, en d'autres termes, la circonstance qui détermine ou empêche la diosmose ?

Deux théories ont été proposées : *Théorie du tamisage mécanique*, *théorie de la solubilité*, pour expliquer le fait de la diosmose ou de la non-diosmose, indépendamment des forces qui sont en jeu.

1° *Théorie du tamis.* — *La membrane diosmotique est un crible arrêtant les grosses molécules.* — Cette théorie est purement mécanique. Elle consiste à assimiler la membrane à un crible ayant des pores plus ou moins grands. Ce crible laissera passer les petites molécules et arrêtera les grosses. La dimension des molécules serait ainsi la condition déterminante.

Nous avons déjà signalé, en étudiant la structure des membranes physiologiques semiperméables (n° *27*), la difficulté de cette explication grossièrement mécanique. A la vérité, conformément à elle, les cellules du rein arrêtent les grosses molécules du sucre et de l'albumine, et livrent passage aux petites molécules des sels. Mais, nous avons vu que ces membranes naturelles livrent passage à de grosses molécules comme celles du bleu de méthylène, de l'urée, de la glycérine, et l'interdisent à des molécules salines beaucoup plus petites ; par exemple, l'ectoplasma des globules rouges du sang est perméable à l'urée et imperméable aux sels de soude du plasma sanguin.

D'autre part, Tammann a donné, en étudiant la perméabilité des membranes de précipité pour les matières colorantes (n° *41*), une démonstration qui paraissait décisive contre la théorie de Traube. En étudiant la diffusion de dix-sept corps colorants à travers des membranes de gélatine tannique, de ferrocyanure de zinc et de ferrocyanure de cuivre, il vit que la première laissait passer onze de ces corps, la seconde sept, la troisième quatre. D'où l'on conclut que les pores de cette dernière sont plus étroits que ceux des deux autres, et que, par conséquent, cette membrane de ferrocyanure de cuivre devait, *à fortiori*, retenir les corps que l'une ou l'autre des deux autres arrêtent. L'expérience contredit cette vue, car la dernière membrane livre passage à trois substances, à savoir : des chlorures de fuchsine, de fuchsine-diamant et de ponceau 3R, qui sont arrêtées par l'une ou l'autre des précédentes. Tel est l'argument. Disons, toutefois, que Meerburg a montré qu'il n'avait pas la valeur qu'on lui attribuait.

Les considérations théoriques ne sont pas moins défavorables à cette explication mécanique de la diosmose. Nous avons vu (n° *40*) que Pfeffer admettait, pour les membranes semiperméables, une osmose moléculaire. L'eau qui traverse une telle membrane — et la même chose est vraie de toute autre substance que l'eau — entre dans les agrégats moléculaires de cette membrane. Elle se dissout dans la matière même qui forme celle-ci ; ou bien elle s'y combine temporairement. La méditation de ces phénomènes avait amené Dutrochet à une idée analogue. Et cette idée est, comme on le voit, exclusive de la doctrine d'un simple tamisage mécanique. En résumé, l'osmose ne dépend pas seulement de la grosseur des molécules du corps diosmosant. Elle dépend encore des forces qui s'exercent entre celles-ci, celles de la membrane et celles de l'eau.

Ostwald (1) a donné une autre forme à la théorie de l'osmose par simple tamisage. Ce ne sont pas les molécules du corps qui traverseraient la membrane semiperméable ; ce sont les éléments dissociés de cette molécule (dissociation électrique), les *ions*. La membrane arrête un corps, si elle arrête ses ions, ou seulement un de ses ions. Il suffit que les ions séparés traversent pour que la membrane soit perméable au corps. L'expérience n'a pas été plus favorable à cette doctrine qu'à la précédente. Tammann (2) a montré qu'il ne suffit pas que les ions isolés soient capables de traverser la

(1) Ostwald, Electrische Eigenschaften halbdurchlässiger Scheidewände (*Zeitschr. für physik. Chem.*, VI, 1890, p. 71).
(2) Tammann, *loc. cit.* (*Zeitschr. für physik. Chem.*, X, 1892, p. 255).

membrane pour que le corps traverse ; et Walden (*loc. cit.*) a vérifié que c'est bien le sel lui-même qui diosmose à travers la membrane et non ses éléments dissociés.

2° *Théorie de la solubilité.* — D'après cette manière de voir, la membrane semiperméable laisse passer une substance à condition qu'elle la dissolve. La dissolution préalable du corps dans la substance même de la membrane est la condition du passage. La diosmose est la diffusion d'un corps à travers un autre dans lequel il se dissout.

C'était, il convient de le rappeler, la conception même de Dutrochet (Voy. n° **19**). Il considérait la membrane osmotique comme un troisième liquide interposé aux deux autres et dans lequel ceux-ci (ou l'un des deux) peuvent se dissoudre, se diffuser, ou avec lequel ils peuvent s'unir. Il a montré que si l'on sépare l'alcool et l'eau par une membrane de caoutchouc qui peut s'imbiber d'alcool, c'était celui-ci qui marchait vers l'eau ; si on le sépare avec une membrane animale, humectable à l'eau, c'est l'eau qui traverse.

Lhermitte, en 1854, a apporté un argument analogue. Il superposait dans une éprouvette à pied trois couches : l'une de chloroforme, au fond ; la seconde d'eau, la troisième d'éther. L'éther se dissout dans l'eau et passe ainsi dans le chloroforme.

Un phénomène de même genre se produit dans le cas de la diosmose des gaz. Deville et Troost (1863) avaient vu que l'hydrogène traversait, à haute température, les parois de fer, de platine et de palladium, et Graham, en 1866, a soutenu que le fait tenait à ce que le gaz se dissolvait réellement dans la substance de la paroi.

Une condition analogue intervient pour assurer le passage de substances diverses à travers la membrane osmotique. La diosmose se rapproche ainsi d'un phénomène de diffusion. Graham, Dubrunfaut et d'autres auteurs ont, en effet, considéré l'osmose comme une sorte de diffusion. C'est là une troisième théorie, intermédiaire aux précédentes.

3° *Théorie de l'hydro-diffusion. — Diosmose de l'eau.* — En particulier, pour ce qui concerne l'eau, son mouvement à travers les membranes semiperméables a été rapproché par quelques auteurs, après Graham et Dubrunfaut, de la diffusion à travers une couche liquide, c'est-à-dire de l'hydrodiffusion.

Cependant le rapprochement n'est pas tout à fait exact. Si l'on peut considérer la membrane humectée d'eau comme une troisième couche interposée dans l'osmomètre, à l'eau pure d'une part, et à la solution saline de l'autre, il n'est pas vrai que cette couche se comporte absolument comme un liquide indifférent et qu'elle soit le théâtre de phénomènes de simple diffusion. Son rôle est plus complexe, chimique peut-être, comme l'admettait Dutrochet. Il fait intervenir, en tout cas, des actions moléculaires. Les forces qui produisent la diffusion, les circonstances du mouvement, sa vitesse, différencient d'ailleurs le phénomène d'osmose de celui de diffusion.

4° *Théorie de la vaporisation.* — On a donné encore une autre forme à la conception du mouvement diosmotique. Nernst l'a exprimée l'un des premiers. La membrane de précipité est un corps colloïdal imbibé d'eau ;

quelle que soit la manière dont cette eau y est fixée, elle peut s'échapper par évaporation. La tension de vapeur qu'elle est capable d'émettre va régler ses échanges avec les milieux en contact. On admet que *la tension de vapeur qu'émet l'eau unie à la membrane est très voisine de la tension de vapeur de l'eau pure*, dans les mêmes conditions. Au contraire, les corps en solution diminuant la tension de la vapeur émise, la force élastique sera moindre du côté de la membrane osmométrique où se trouve le sel dissous. Il y aura donc passage de ce côté, distillation, mouvement d'eau vaporisée. Ce mouvement se continuera jusqu'à ce que la tension de la vapeur soit la même des deux côtés. C'est là une conception de l'osmose qui est très féconde. Elle rattache la mesure de la pression osmotique à celle des tensions de vapeur (tonométrie).

§ III. — RÉSULTATS DES MESURES OSMOTIQUES DIRECTES. — VALEURS NUMÉRIQUES. — LOIS DE L'OSMOSE

SOMMAIRE. — **43**. Influence de la concentration de la solution. — **44**. Influence de la température. — **45**. Lois de l'osmose. — **46**. La pression osmotique est indépendante de la membrane, de sa nature, de son épaisseur. — **47**. Observations sur les différentes manières d'exprimer la concentration. — **48**. Comparaison des pressions osmotiques des cristalloïdes et des colloïdes. — **49**. Comparaison des résultats obtenus avec les membranes ordinaires et avec les membranes de précipité. — **50**. Limites d'application des lois fondamentales. — **51**. Comparaison des solutions différentes. Isotonie. Hypertonie. Hypotonie.

Pfeffer a exécuté trois espèces de mesures : des mesures de vitesse osmotique (Voy. n° 7), c'est-à-dire de vitesse d'ascension de la colonne d'eau qui s'introduit dans le vase intérieur de l'osmomètre. En second lieu, il a exécuté des mesures de perméabilité de la membrane, c'est-à-dire qu'il a déterminé les quantités d'eau qui traversaient par filtration la membrane sous l'influence de pressions variables. Enfin, il a mesuré des pressions osmotiques. Ce sont ces dernières mesures qui nous intéressent surtout.

Les expériences étaient faites d'abord à température constante. De là une première série de mesures. Puis, dans une seconde série, l'influence de la température a été déterminée.

En opérant à température constante, on peut chercher la valeur de la pression osmotique correspondant à une même substance dissoute à des degrés divers de concentration. En second lieu, on peut comparer des substances différentes.

43. *Influence de la concentration*. — 1° Il s'agit donc en premier lieu, opérant avec la même membrane, de mesurer la pression osmotique finale correspondant à des concentrations diverses.

Pfeffer a opéré d'abord avec le sucre de canne. Il a étudié des solutions contenant en poids : 1 p. 100 ; 2 p. 100 ; 2,74 p. 100 ; 4 p. 100 ; 6 p. 100 de saccharose. La température restait constante pendant la durée de chaque

expérience ; elle a varié un peu d'une expérience à l'autre, ce qui crée une petite difficulté pour la comparaison.

Voici les résultats :

Sucre de canne.

Solution à 1 p. 100.	Température : 13°,6.	Pression osmotique : 53,2	centim. de mercure.
— —	— 13°,7	— 53,8	—
— à 2 p. 100.	— 14°,0	— 101,6	—
— à 1,74 p.100.	— 13°,5	— 151,8	—
— à 4 p. 100.	— 13°,8	— 208,2	—
— à 6 p. 100.	— 14°,7	— 307,5	—

En second lieu, Pfeffer a opéré avec la gomme arabique. Il a obtenu les résultats suivants :

Solution à 1 p. 100.	Température : 16°,1.	Pression osmotique : 7,2	centim. de mercure.
— à 6 p. 100.	— 16°,1	— 26,3	—
— à 18 p. 100.	— 15°,7	— 119,7	—

On aperçoit nettement, en ce qui concerne le sucre, la proportionnalité de la pression osmotique à la concentration. En ce qui concerne la gomme arabique, la proportionnalité existe encore pour la première et la dernière solution ; la seconde fournit une valeur aberrante.

Dans une troisième série d'expériences, on a observé les pressions osmotiques correspondant à des solutions de concentrations variables de salpêtre.

Solution à 0,80 p. 100.....	Temp. = 13°,2.	Pression osmotique : 130,4
— 0,86 —	— 12°,6	— 147,5
— 1,43 —	— 12°,9	— 218,5
— 3,30 —	— 13°,0	— 436,8

La loi de la proportionnalité entre la pression osmotique et la concentration, cette fois, ne se vérifie que d'une manière approximative.

Si on compare ces trois substances à des concentrations de 1 p. 100, les pressions osmotiques sont entre elles sensiblement comme les nombres : 1 gomme ; 7,29 pour le sucre ; 22 pour l'azotate de potasse.

44. *Influence de la température.* — La pression osmotique varie avec la température. Cette influence de la température a été étudiée par Pfeffer sur des solutions de sucre à 1 p. 100 et de gomme à 14 p. 100.

Il a été fait trois séries d'expériences avec la solution de sucre à 1 p. 100.

1re série. — *a*...	Température........ 14°,2.	Pression osmotique : 51	cent. mercure.
	Même solut. portée à 32°,0	— 54,4	—
2e série. — *b*...	Température........ 6°,8	Pression osmotique : 50,5	—
	— .... 13°,7	— 52,5	—
	— .... 22°,0	— 56,7	—
3e série. — *c*...	Température........ 15°,5	Pression osmotique : 52,0	—
	— .... 36°,0	— 56,7	—

Avec la gomme arabique, en solution à 14 p. 100, on a eu les résultats suivants :

Température : 13°,3	Pression osmotique : 69,2
— 36°,7	— 72,4

On voit donc que la pression osmotique croît avec la température. C'est le résultat que Dutrochet avait déjà obtenu (Voy. n° **13**). Cette augmentation est faible ; les nombres la manifestent ; mais on n'aperçoit pas la nature de leur liaison. La loi qui la régit a échappé à Pfeffer et à ses successeurs, jusqu'à Van t'Hoff. Eckhardt, qui essaya d'obtenir par interpolation la fonction qui lie la pression osmotique à la température, ne l'aperçut pas davantage. Van t'Hoff, conduit par des idées théoriques, avait été amené à penser que la pression osmotique devait être liée à la température, par la même relation que la pression gazeuse ; en d'autres termes, que la loi de Gay-Lussac et Regnault, c'est-à-dire que la loi du binôme de dilatation, s'y appliquait :

La pression osmotique croît proportionnellement au binôme de dilatation $(1 + \alpha t)$ $\left(\alpha \text{ est le coefficient de dilatation des gaz, } \frac{1}{273}\right)$. On peut écrire : $1 + \alpha t = \frac{1}{273}(273 + t)$. Or $273 + t$ c'est la température centigrade à laquelle on a ajouté 273, c'est la *température absolue*.

On constate que les résultats numériques précédents s'accordent suffisamment avec cet énoncé.

45. Lois de l'osmose. — Les deux lois qui ressortent de ce petit nombre de déterminations sont les suivantes :

Loi des concentrations : *La pression osmotique varie, pour une même substance, proportionnellement à la concentration.*

Loi des températures : *La pression osmotique d'une solution donnée varie proportionnellement a la température absolue* (au binôme de dilatation).

Application. — Une solution de sucre de canne à 1 p. 100 a, à 0°, une pression osmotique de 49,3 centim. mercure. Une solution de concentration n (c'est-à-dire contenant n grammes de sucre pour 100 grammes d'eau) aura une pression osmotique $\pi = n \times 49{,}3 \times (1 + 0{,}00367\, t)$.

46. La pression osmotique est indépendante de la membrane, de sa nature, de son épaisseur. — Les mesures de pression faites avec des osmomètres différents, munis de membranes diverses, donnent des résultats sensiblement identiques. Si l'on opère avec des cloisons de ferrocyanure de cuivre, de bleu de Prusse, de phosphate de chaux, ou quelque autre, — à la condition qu'elles soient réellement hémiperméables, — l'on retombera sur les mêmes valeurs ; la pression osmotique ne dépend plus alors que de la solution employée et de ses diverses conditions. C'est un nombre qui reste attaché à chaque solution comme un paramètre physique.

C'est là le grand résultat de l'introduction des membranes hémiperméables dans la question de l'osmose. Les premières recherches de Dutrochet avec les membranes ordinaires montraient la dépendance des phénomènes de l'osmose d'avec la membrane ; les recherches de Pfeffer avec les membranes semi-perméables montrent l'osmose indépendante de la membrane. La pression osmotique devenant alors une constante physique des solutions, la question de l'osmose s'est trouvée ainsi transportée sur le terrain de la physique ; les physiciens, et Van t'Hoff en premier lieu, n'ont pas tardé à y mettre la main.

Une membrane hémiperméable, quelle qu'elle soit, peut donc servir, aussi bien que toute autre membrane hémiperméable, à la mesure de la force osmotique d'une solution. Il était légitime, en conséquence, d'employer pour les mesures osmotiques — en outre des membranes artificielles de Traube, de Pfeffer et de leurs imitateurs — des membranes naturelles, celles des cellules vivantes (membrane plasmatique). Il va être question, tout à l'heure, de cette méthode physiologique de détermination des pressions osmotiques.

L'influence de la membrane, de sa nature, de son épaisseur, ne se fait sentir que sur la *durée* des phénomènes qui aboutissent à l'équilibre osmotique. La vitesse du courant osmotique, du mouvement de l'eau, de la filtration sous pression, sont influencées par ces conditions : la hauteur osmotique en est indépendante. Le processus chronologique du phénomène est seul affecté, si l'on fait changer la nature de la membrane ou son épaisseur.

47. *Observation à propos de la manière d'évaluer les concentrations.* — Dans les études sur l'osmose et les sujets qui s'y rattachent, nous devrons observer qu'il y a trois manières d'apprécier les concentrations, manières très différentes et dont l'usage simultané devient une source d'embarras et de confusion.

1° Une première définition de la composition d'une solution, de sa concentration, est donnée par le nombre de grammes du corps dissous contenu *dans 100 grammes de dissolvant.* Pour une solution aqueuse de sel, c'est le nombre de grammes de sel p qui correspond à 100 grammes d'eau. La solution serait réalisée en mêlant p grammes du sel à 100 grammes d'eau.

2° On désigne encore par concentration le nombre de grammes du sel p' contenu *dans 100 grammes de la solution.*

3° Un troisième moyen d'appréciation consiste dans le calcul en volumes. La composition de la solution est exprimée par le nombre de grammes qui existent *dans 100 centimètres cubes de la solution*, soit p''. C'est le moyen d'appréciation le plus usuel, en osmose. A moins d'avis contraire, quand on parle de la concentration d'une solution, il s'agit de la *concentration en volume. La concentration d'une solution est le nombre* c *de grammes du corps dissous dans 100 centimètres cubes de la solution.*

On passe facilement de l'une de ces manières d'exprimer la concentration, à l'autre, en remarquant que p grammes dans 100 grammes d'eau équivalent à $\frac{100p}{100+p}$ grammes dans 100 grammes de solution, et à $\frac{pDd.100}{100d+pD}$ grammes dans un litre de solution [en supposant que la solution se fait sans condensation et en désignant par D la densité du solvant (eau) et par d celle du corps dissous]

On a donc

$$p' = \frac{100p}{100+p} \qquad (1)$$

$$p'' = \frac{pDd100}{100d+pD} \qquad (2)$$

$$= 100\frac{D}{d}.\frac{100p''}{100d-p''}. \qquad (3)$$

Ces formules permettent de passer d'un mode d'évaluation de la concentration à l'autre. Par exemple on en tire p en fonction de p'

$$p = \frac{100\,p'}{100 - p'} \tag{4}$$

p en fonction de p''

$$p = \frac{d}{D}\,\frac{100\,p''}{100 - dp''} \tag{5}$$

p'' en fonction de p'

$$p'' = \frac{Dd.\,100\,p'}{p'\,D + (100 - p')\,d} \tag{6}$$

On peut introduire dans les formules relatives à la concentration la notion des *volumes spécifiques* du dissolvant et du corps dissous. Le *volume spécifique* du corps dissous v est le volume auquel est étendue l'unité de poids de ce corps dans la solution. C'est le volume occupé dans la solution par l'unité de poids, par le gramme du corps dissous. — Le volume spécifique V du dissolvant est, de même, le volume occupé dans la solution par 1 gramme de dissolvant.

On voit facilement, en considérant un volume total de solution égal à 100 c. c., que l'on a, par définition, $v = \frac{100}{p''}$ ou $p'' = \frac{100}{v}$ (7)

On a très facilement, $p' = \frac{100\,V}{V + v}$ (8)

$$p = 100\,\frac{V}{v} \tag{9}$$

4° *Concentration moléculaire.* — Il est fréquent, également, au lieu d'exprimer la concentration en grammes, de l'exprimer en *molécule-gramme,* c'est-à-dire en fraction du poids moléculaire. C'est l'habitude de De Vries.

Par exemple, une solution de glycérine de degré de concentration 0,21 indique une solution contenant, par litre, $\frac{21}{100}$ de 92 grammes (92 est le point moléculaire de la glycérine ($C^3H^8O^3 = 92$). Une solution de nitre de concentration 0,14 indique une solution contenant, par litre, $\frac{14}{100}$ du poids moléculaire du nitre, qui est 101 grammes ($KAzO^3 = 101$).

5° Quelques auteurs évaluent la *concentration en volume* par litre, et non par 100 centimètres cubes. La concentration d'une solution est le nombre de grammes du corps dissous dans un litre de solution. C'est alors un nombre dix fois plus grand que le nombre ordinaire.

D'autres auteurs, encore, évaluent la concentration en volume par 10 litres, au lieu de l'estimer par 100 centimètres cubes ou par litre. C'est le nombre de grammes du corps dissous dans 10 litres. Le nombre est alors cent fois plus grand que le nombre ordinaire. La raison de ce choix, ainsi que du choix de la *solution type* dont il va être question, sera donnée plus loin (Voy. n° ***62***).

6° *Solution type.* — Parmi les diverses solutions, plus ou moins étendues concentrées, que l'on peut faire d'une substance donnée, dans l'eau, il y en a une qui est fondamentale au point de vue de la comparaison des substances égale à
entre elles. — C'est celle qui répond à la *concentration moléculaire*, c'est-à-dire au poids moléculaire dissous dans un même volume de solution (100 centimètres cubes, ou 1 litre, ou, plus souvent, 10 litres). On la prend pour type.

La solution type, pour une substance donnée, est celle qui contient le poids moléculaire du corps, exprimé en grammes (molécule-gramme) dissous dans 10 litres de solution; c'est la solution décinormale.

Il résulte de là que la *concentration en volume* de la solution type [définie comme plus haut (Voy. 3°) : le nombre de grammes dissous dans 100 centimètres cubes de solution] est la *centième partie du poids moléculaire.* M étant le poids moléculaire du corps dissous dans 10 litres = 10 000 centimètres cubes, $\frac{M}{100}$ sera le poids dissous dans 100 centimètres cubes ; ce sera la concentration c de cette solution type :

$$c = \frac{M}{100}$$

Par exemple, la concentration de la solution type de saccharose est 3,42 (342 poids moléculaire du sucre $C^{12}H^{22}O^{4}$); la concentration de la solution type d'azotate de potasse est 1,01 (101 étant le poids moléculaire de ce corps), etc.

Application. — Dans l'étude des phénomènes osmotiques, les transformations de ces me sures les unes dans les autres sont continuelles. Il y a, en particulier, un de ces calculs qui revient très fréquemment.

Supposons le poids moléculaire m d'une substance dissous dans 1 litre de la solution. Quel sera le poids p dans 100 grammes du dissolvant ? Quel sera le poids p' dans 100 grammes de la solution ?

Le poids m est égal à dix fois ce que nous avons appelé p'' dans les formules précédentes. Il faut donc poser :

$$m = \frac{1\,000}{V} \tag{10}$$

d'où

$$p = \frac{m}{10} V \tag{11}$$

c'est l'expérience que donne v et V.

48. Comparaison des pressions osmotiques des cristalloïdes et des colloïdes. Caractères généraux de ces deux catégories de corps. — La loi des concentrations fait connaître les variations que subit la pression osmotique pour les diverses solutions d'une même substance. Elle ne fournit aucune lumière sur la comparaison des substances différentes. Quand on considère des substances différentes, on peut être tenté pour les mettre en parallèle de les prendre au même degré de concentration ou au même degré de densité. C'est ainsi que l'on procédait jusqu'à de Vries et Van t'Hoff ; ces savants montrèrent que la valeur de la pression osmotique des divers corps est en rapport avec leur concentration moléculaire. Auparavant on prenait des séries de solutions à 1 p. 100, à 6 p. 100, etc. ; on déterminait leurs pressions respectives.

L'examen des valeurs numériques obtenues dans ce cas a cependant fourni quelques résultats intéressants. Le premier est relatif à la comparaison des colloïdes et des cristalloïdes. La distinction des corps en colloïdes et en cristalloïdes est due à Graham. Les premiers ont une diffusibilité faible, mais

d'ailleurs créent peu d'obstacle à la diffusion des autres (1) ; ils sont amorphes. Ils peuvent être très solubles dans l'eau; leur nom de colloïdes leur vient de ce qu'ils peuvent prendre généralement la forme de gelées, telles la silice hydratée, l'alumine hydratée, l'hydrate de peroxyde de fer, l'albumine, les gommes, les dextrines, l'amidon soluble, la gélatine, etc. C'est souvent sous la forme de gelée que les colloïdes se séparent de leurs solutions, tandis que les cristalloïdes s'en séparent à l'état de cristaux.

Les cristalloïdes ont une diffusibilité variable, mais, en général, très supérieure à celle des colloïdes. Les colloïdes, examinés dans l'osmomètre à membrane semiperméable, montrent un pouvoir osmotique faible. Graham (1862) s'était trompé en leur attribuant un pouvoir osmotique élevé. Ce sont, en réalité, des corps qui diffusent mal et qui donnent une pression osmotique minime.

Par exemple : Pfeffer (*loc. cit.*, p. 73), avec des solutions à 6 p. 100 de concentration, a obtenu les résultats suivants :

Solution à 6 p. 100.	Pression osmotique. (Centimètres cubes de mercure.)
Gomme arabique	25,9
Colle liquide	23,8
Sucre de cannes	287,7
Azotate de potasse	700,0
	T = 15°

Les colloïdes, gomme arabique et colle liquide, dans ces conditions de concentration égale (de densité à peu près égale aussi) ont un pouvoir osmotique considérablement inférieur à celui des cristalloïdes, sucre et salpêtre, et encore, ce pouvoir si faible est-il majoré par les cristalloïdes (sels) qui existent à l'état d'impureté dans ces substances.

Les caractères des colloïdes se trouvent ainsi complétés. Ce sont des corps amorphes, très peu diffusibles, mais dont les solutions n'opposent pas de résistance spéciale aux substances nettement diffusibles; ces mêmes solutions ont un pouvoir osmotique faible; elles sont susceptibles de se prendre en gelée, en coagulum, sous des influences diverses.

On distingue généralement les solutions des colloïdes de celles des cristalloïdes, au point de vue de leur constitution.

Les solutions des cristalloïdes sont de véritables solutions. Elles sont réellement homogènes. Ce sont des mélanges homogènes du corps dissous et du dissolvant, à un tel degré de division que ce mélange est transparent. Les particules dernières dans lesquelles s'est divisé le corps dissous sont très petites : la transparence indique qu'elles sont plus petites que la plus petite des longueurs d'onde lumineuses, c'est-à-dire que quelques dix-millièmes de millimètre (dixièmes de micron). Ce sont vraisemblablement des molécules au sens chimique du mot, isoées les unes des autres par le dissolvant, ou ce sont, tout au plus, des groupements de ces molécules. En tous cas, ces parti-

(1) C'est, en effet, une des lois de la Diffusion. Les substances diffusibles, cristalloïdes, diffusent à travers les colloïdes, la gélatine par exemple, sensiblement de la même manière et aussi rapidement qu'à travers l'eau pure.

cules dernières, molécules, molécelles de Pfeffer, ions, ne contractent pas avec les particules du dissolvant d'association spéciale, n'englobent pas celles-ci. Le dissolvant n'existe pas dans la solution sous deux états.

Les solutions de colloïdes, au contraire, sont des pseudo-solutions (Duclaux, Linder) ; elles ne sont pas réellement homogènes (Oswald). Le dissolvant, l'eau y est à deux états (n^{os} **20** et **30**). Une partie est unie aux molécules du corps dissous et forme avec celles-ci des agrégats mixtes, micelles de Naegeli, tagmas de Pfeffer, monades de Raoult ; l'autre partie forme le dissolvant réel qui écarte ces agrégats mixtes, ces particules complexes. Si la quantité d'eau n'est pas suffisante, ces agrégats peuvent n'être pas entièrement isolés et libérés : le colloïde est alors seulement gonflé par l'eau. La première phase de la dissolution d'un colloïde est souvent le gonflement. Quand la solution a eu lieu, elle n'est pas toujours stable et définitive (Duclaux, Grimaux). Sous l'action d'une trace de substance étrangère, d'un changement de température, etc., la solution peut se prendre en une masse plus ou moins élastique, en gelée, en caillot ; il se produit un arrangement, une liaison des agrégats, tagmas ou micelles, qui les solidarise en un tout englobant l'eau intermédiaire. Avec le temps, celle-ci peut être ultérieurement expulsée en partie.

49. Comparaison des résultats obtenus avec les membranes ordinaires et avec les membranes de précipité. — En opérant avec des membranes ordinaires, la supériorité des cristalloïdes n'apparaît plus Dutrochet (Voy. n° ***11***), en prenant des solutions de même densité (c'est-à-dire, en fait, sensiblement de même concentration) avait trouvé les pressions osmotiques suivantes : gélatine, 3 ; gomme, 5,17 ; sucre de canne, 11 ; albumine d'œuf, 12. — Le chiffre est certainement beaucoup trop élevé pour l'albumine, à cause des notables proportions de sels qu'elle contient (3 p. 100 de cendres). Il n'en est pas moins vrai que la gélatine et la gomme, corps colloïdes, ont ici un pouvoir osmotique moindre que le sucre cristallisable. Mais, les valeurs se rapprochent : au lieu d'être 12 fois moindres que pour le sucre, comme nous venons de le voir (n° ***48***), elles ne le sont plus que 2 et 3 fois. — Elles peuvent même devenir plus grandes, si la membrane et les conditions d'expérience sont convenablement choisies. Pfeffer cite l'expérience suivante :

Solution à environ 6 p. 100.	Pression osmotique. Membrane de papier parcheminé.	Pression osmotique. Membrane animale (péricarde de veau).
Gomme arabique	17,7	14,2
Colle liquide	21,3	15,4
Sucre de canne	29,0	14,5
Salpêtre	20,4	8,9
	T = 24°	T = 22°

On voit, dans la seconde série, le sucre et le salpêtre présenter une pression osmotique moindre que la gomme et la colle.

Ces résultats s'expliquent facilement : Une membrane de précipité qui laisse diosmoser un sel ne permet pas d'arriver à un équilibre osmotique tout à fait stable, ni tout à fait aussi élevé que si le corps ne diosmosait pas. Elle

se comporte (à un degré infiniment moins marqué) comme une membrane ordinaire. Plus le corps diosmosera, plus basse sera la pression obtenue. Ainsi, avec une membrane ordinaire, la pression osmotique d'un cristalloïde peut être excessivement abaissée, comme on le voit par l'exemple du salpêtre dans l'expérience précédente. Inversement, la pression des colloïdes, gomme, colle, loin d'être abaissée dans les mêmes proportions, se trouve à peu près la même qu'avec une membrane de précipité, parce que ces corps ne diosmosent guère plus à travers les cloisons ordinaires qu'à travers les cloisons hémi-perméables. La pression osmotique est d'autant plus près de son maximum que le corps diosmose moins.

50. Limites d'application des lois fondamentales. — Les expériences d'osmose directe à travers les membranes artificielles de précipité comportent encore quelques remarques relativement aux conditions et aux limites d'application des deux lois fondamentales.

1° En ce qui concerne la loi des concentrations, on devra remarquer qu'elle correspond surtout aux faits constatés avec des solutions faibles. Lorsque les concentrations sont fortes, la pression osmotique croît plus vite que la concentration ;

2° A propos de la loi des températures, on observera que les variations de pression osmotique sont minimes pour les variations thermiques, elles-mêmes minimes, qui se produisent autour de la moyenne de nos climats. Il en résulte que, chez les êtres vivants, la pression osmotique subit peu de changement du fait des oscillations thermiques, et que, si la signification physique de cette loi est considérable, son importance physiologique est beaucoup plus restreinte.

La plupart des questions soulevées par l'application de ces lois trouveront mieux leur place, plus loin, après que l'on connaîtra les nombreuses déterminations qu'a permis d'exécuter la méthode de la plasmolyse.

51. Comparaison des solutions différentes. Isotonie. Hypertonie. Hypotonie. — L'osmose, entre deux solutions aqueuses, se déduit de l'osmose de chacune d'elles vis-à-vis de l'eau pure :

1° *Solution en présence de l'eau pure.* — A travers la membrane hémi-perméable, l'eau pure passe dans la solution et la dilue. Le mouvement se continue, jusqu'à ce que la pression opposée à la pénétration atteigne une valeur suffisante pour lui résister efficacement. Une telle contre-pression est bientôt réalisée par la colonne du liquide intérieur dont le niveau s'élève ; elle peut l'être aussi bien par une colonne de mercure, par la tension de l'air comprimé d'un manomètre en rapport avec l'osmomètre; ou de toute autre façon. La valeur de cette contre-pression donne la pression osmotique π de la solution, telle qu'elle est (c'est-à-dire avec la concentration qu'elle a), au moment de l'équilibre. L'équilibre osmotique, c'est-à-dire l'absence de mouvement des liquides de part et d'autre de la membrane a reçu le nom d'*isosmose* ;

2° *Solution en présence d'une solution de même substance.* — Il peut

y avoir, de chaque côté de la membrane hémiperméable, des solutions de même substance, des solutions sucrées, par exemple. — Si les concentrations sont les mêmes, il y a identité de part et d'autre et par conséquent équilibre. — Si les concentrations sont inégales, il n'en sera plus de même. A la concentration la plus grande, à l'intérieur de l'osmomètre par exemple, correspond la pression osmotique la plus grande π_1 : à l'extérieur, supposons la concentration moindre et, par suite, la pression osmotique moindre π_2. On a $\pi_1 > \pi_2$. Les choses se passeront alors comme s'il y avait à l'intérieur une solution sucrée de pression osmotique $\pi_1 - \pi_2$ et de l'eau pure à l'extérieur. Il y aura mouvement de pénétration, à moins qu'une contre-pression s'y oppose. La concentration diminuera au dedans, augmentera au dehors. La différence diminuera : $\pi_1 - \pi_2$ descendra $\pi'_1 - \pi'_2$ plus petite, et finalement le mouvement s'arrêtera lorsque les deux pressions seront devenues les mêmes, et par conséquent les concentrations. L'équilibre (c'est-à-dire l'*isosmose*) suppose donc l'égalité des pressions osmotiques (c'est-à-dire l'*isotonie*).

3° Enfin, on peut avoir affaire à deux solutions de substances différentes. C'est encore la différence des pressions osmotiques qui règle les phénomènes. L'eau passera du compartiment où la pression osmotique π_2 est la plus petite, dans celui où elle est plus grande π_1. Ce mouvement aura lieu — à moins de contre-pression artificielle, — jusqu'à ce que la différence $\pi_1 - \pi_2$ soit nulle. L'*isosmose* (équilibre des échanges osmotiques) se produit encore lorsqu'il y a *isotonie*, c'est-à-dire lorsque les pressions osmotiques sont égales. Les solutions *isotoniques* sont celles qui ont même pression osmotique ; elles sont *isosmotiques*, c'est-à-dire en équilibre l'une par rapport à l'autre. Lorsque deux solutions sont *anisotoniques*, c'est-à-dire ont des pressions osmotiques différentes, elles sont *anisosmotiques* ; celle qui a la plus grande pression osmotique est *hypertonique* ; celle qui a la plus faible est *hypotonique*.

§ IV. — MÉTHODE PHYSIOLOGIQUE. DÉTERMINATIONS OSMOMÉTRIQUES COMPARATIVES DE DE VRIES. PLASMOLYSE. — ISOTONIE.

SOMMAIRE. — **52**. Assimilation de la cellule végétale à un osmomètre de Pfeffer. — **53**. Turgescence des cellules végétales. Son rôle. — **54**. Valeur de la force de turgescence ou pression osmotique. — **55**. Appréciation de l'isosmose (isotonie) de deux solutions par la mesure des volumes cellulaires. — **56**. Appréciation de l'isosmose (isotonie) par le début de la plasmolyse. — **57**. Choix des indicateurs. — **58**. Régression de la plasmolyse. Absorption. — **59**. Variations du pouvoir osmotique des cellules par suite des mutations nutritives. — **60**. Résultats fournis par la méthode physiologique de De Vries. Vérification de la loi des concentrations. — **61**. Distinction essentielle des solutions en deux classes : substances organiques (non électrolytes) ; sels minéraux (électrolytes). — **62**. Loi des concentrations moléculaires pour les substances osmotiques, non électrolysables. — **63**. Conséquence de la loi de concentration moléculaire : analogie des corps dissous avec les corps gazeux. — **64**. La grande majorité des solutions salines paraît faire exception à la loi des concentrations moléculaires. — **65**. Distinction des solutions étendues et des solutions concentrées. — **66**. Solutions salines étendues. Loi des coefficients isotoniques : *a*. Série II. Sels alcalins. Coefficient $\frac{2}{3}$.

Coefficient entier, 3. — *b*. Série III. Sels alcalins à 2 atomes de métal. Sels alcalino-terreu à 2 molécules d'acide. Coefficient entier, 4. — *c*. Série IV. Sels alcalins à 3 atomes de métal Coefficient isotonique, 5. — **67**. Règle mnémonique des coefficients isotoniques. — **68**. Application. Moyen de connaître immédiatement la pression osmotique d'une solution quelconque, étendue, d'un sel quelconque. — **69**. Application. Constituer une solution d'un corps isotonique à une autre solution quelconque.

Les expériences de Pfeffer et de ses successeurs n'ont permis qu'un petit nombre de déterminations; celles-ci ont l'avantage d'être directes et très précises; mais elles sont longues et délicates. La méthode physiologique, imaginée par de Vries, ne donne pas pour la pression osmotique d'une solution une mesure directe, en grandeur absolue; elle donne des mesures relatives, mais elles sont rapides et faciles. Cette méthode permet de juger si une solution a la même pression osmotique qu'une autre, c'est-à-dire d'apprécier l'*isosmose* ou l'*isotonie* de deux solutions.

Il est facile de transformer ces mesures relatives en mesures absolues, car l'on connaît déjà la pression osmotique réelle d'un certain nombre de solutions.

52. ***Assimilation de la cellule végétale à un osmomètre de Pfeffer.*** — De Vries a assimilé la cellule végétale à un osmomètre de Pfeffer. La *membrane cellulaire* est l'analogue du vase poreux : elle est perméable à l'eau et aux sels, en général à tous les cristalloïdes; elle remplit l'office d'organe de soutien; en dedans, la membrane limitante du corps cellulaire, ou *membrane plasmique* exactement adossée à l'enveloppe précédente, représente la membrane de ferrocyanure de cuivre, seulement perméable à l'eau; au centre, formant comme une sorte de lac, le *suc cellulaire*, solution de sels, de sucre, de substances diverses.

53. ***Turgescence des cellules végétales. — Son rôle.*** — Cette image de la cellule est un peu trop simplifiée; elle a besoin d'être complétée.

Une telle interprétation ne tient compte, en effet, que de la couche externe du protoplasma — membrane plasmique — qui seule, en effet, possède les propriétés caractéristiques des cloisons hémiperméables. Quant à la masse protoplasmique, elle-même plus ou moins perméable aux corps dissous, elle se confond, au point de vue des phénomènes qui nous occupent, avec le contenu de la membrane plasmique, avec le suc cellulaire. Mais, et c'est là le point à noter, la masse protoplasmique est, en réalité, creusée d'une cavité pour le suc cellulaire, et séparée de lui par une nouvelle membrane hémiperméable, paroi de la vacuole centrale. Cette vacuole centrale, pleine de suc cellulaire, constitue ainsi comme un second osmomètre inclus dans le premier, mais un osmomètre à parois extensibles. Le second sac osmotique se met donc en équilibre avec le liquide qui l'entoure, et les conditions sont exactement les mêmes que celles d'un osmomètre unique. La même chose est vraie, si, au lieu d'une vacuole centrale, il y a dans la masse protoplasmique une série de vacuoles plus ou moins nombreuses (1).

(1) H. de Vries fait de la paroi des vacuoles une membrane distincte ayant des caractères de résistance vitale et d'imperméabilité aux corps dissous tout à fait remarquables et plus accentués que la membrane plasmique extérieure. La vacuole, avec sa paroi si particulière,

En résumé, la cellule équivaut donc à un système de deux (ou plusieurs) membranes plasmatiques, hémiperméables, incluses l'une dans l'autre, et se comporte comme un osmomètre unique de Pfeffer.

Cette assimilation de la cellule végétale à un osmomètre à membrane hémiperméable nous fait comprendre les phénomènes de tension qui se développent à l'intérieur des cellules végétales. Celles-ci forment un sac osmotique rempli de solutions salines et entouré d'eau, ou, du moins, du liquide dilué qui forme l'atmosphère intérieure du végétal. Elles doivent donc être le siège d'une pression osmotique interne plus ou moins considérable. Le protoplasma semi-fluide est, par suite, repoussé fortement contre la *membrane cellulaire*; celle-ci, distendue, résiste par son élasticité.

Cette distension a pour conséquence la *rigidité*; et cela, par la même raison qui fait qu'une mince membrane de caoutchouc remplie d'air forme un ballon résistant. Tout ce petit appareil anatomique est donc normalement rempli, distendu, turgide. C'est cet état de la cellule végétale, remplie, tendue, rigide, que l'on nomme *turgescence*. Nous voyons que l'origine de cet état de choses est tout simplement la pression osmotique; c'en est une simple conséquence, et l'on aurait pu se dispenser peut-être de créer ces mots de *turgescence, force de turgescence* ou *turgor*.

Beaucoup de phénomènes de la vie végétale sont liés à cette condition de la turgescence. C'est à elle que la plante jeune doit le maintien de sa forme et de sa figure; son port, en un mot. Plus tard, d'autres facteurs interviennent pour assurer la rigidité; dans les tissus vieillis, il s'est produit des incrustations de la membrane cellulaire par la lignine, ou la subérine; ces dépôts plus ou moins durs font l'office d'une charpente; ils assurent la solidité de la plante et garantissent les parties contre l'écrasement réciproque. Mais, dans les tissus jeunes, il n'en est pas ainsi; tout ce qui y existe, protoplasme ou membrane, est mou, semi-fluide, incapable de se tenir par soi-même. La jeune tige s'effondrerait comme un sac vide, si les cellules n'étaient distendues et rendues rigides par la pression osmotique interne.

54. *Valeur de la pression osmotique ou force de turgescence.* — Cette tension interne peut être considérable. Elle varie, en moyenne, de cinq à onze atmosphères chez la plupart des plantes terrestres ou d'eau douce. Les matériaux qui remplissent leurs cellules sont isosmotiques à des solutions de nitrate de potasse dont la concentration varie de 1,5 à 3 p. 100. Dans les cas les plus défavorables, elle ne descend pas au-dessous de 3 atm. 5 (tension osmotique de la solution de nitrate à 1 p. 100). Elle atteint son plus haut degré dans les plantes bien nourries, dans les cellules où se sont accu-

constituerait donc un véritable organe ayant une existence distincte, un *tonoplaste*. H. de Vries manifeste ces propriétés de résistance de la membrane vacuolaire en plongeant dans une solution de nitrate de potasse à 10 p. 100 colorée par l'éosine, des préparations de divers tissus végétaux, feuilles de *Vallisneria*, écailles d'*Hyacinthus*, poils staminaux de *Tradescantia*, et surtout filaments de *Spirogyra nitida*. Le protoplasma cellulaire meurt et se colore; les vacuoles restent pâles, s'isolent du protoplasma mort et ne sont atteintes que tardivement par la substance colorante. [Plasmolytische Studien (*Pringsheim's Jahrbüchern*, XVI, p.465, 1885).

mulées des matières de réserve solubles et non diosmotiques. Dans les cellules de la betterave, il peut y avoir du sucre de saccharose à la concentration de 25 à 30 p. 100 — isotonique à une solution de salpêtre de 5 à 6 p. 100 — ce qui correspond à une pression osmotique de 15 à 21 atmosphères.

Quant aux plantes qui peuvent vivre dans des eaux salines concentrées, la pression osmotique peut y atteindre des valeurs plus grandes, quelquefois énormes. Chez les Algues marines, le suc cellulaire est isotonique à la solution de salpêtre à 3,7 p. 100 et à celle de NaCl à 3 p. 100, ce qui équivaut à environ 14 atmosphères. Enfin, l'*Aspergillus niger*, le *Penicillium glaucum*, prospèrent dans des solutions, équivalant, au point de vue osmotique, au nitrate de potasse de concentration 45 p. 100, et la tension interne y atteint une valeur de 160 atmosphères. On peut se demander comment des organismes, en apparence si délicats, peuvent résister à des tensions pareilles. On le comprendra si l'on se rappelle que dans ces cellules la paroi s'épaissit et les dimensions se réduisent et l'on sait, d'autre part, que la résistance varie en raison inverse du rayon de courbure.

Ces pressions osmotiques énormes interviennent dans quelques effets mécaniques très puissants, attribués autrefois à la seule imbibition, tels le gonflement des graines en germination, des bois, des cordes. Sans connaître l'énormité des tensions internes des éléments cellulaires, les botanistes, antérieurement à Pfeffer et de Vries, en avaient eu le soupçon. Avant d'identifier cette force à la pression osmotique, ils l'appelaient *force de turgescence* ou simplement *turgescence* ou *turgor*. Sachs (1871) avait donné une définition claire de cette force de turgescence et mis en relief son importance. Il avait fait intervenir les variations de cette force pour rendre compte de l'accroissement des végétaux. De Vries, son élève, a donné plus de précision à cette idée. Il a rattaché le phénomène de l'accroissement du végétal à l'action dilatatrice et extensive que cette force de turgescence exerce sur la membrane cellulaire. Les botanistes admettent généralement cette influence de la pression osmotique sur le développement ; ils ne diffèrent que quant à la part plus ou moins grande, ou même exclusive, qu'ils lui attribuent.

55. *Appréciation de l'isosmose (isotonie) de deux solutions par la mesure des volumes cellulaires.* — Si l'on vient à plonger cet appareil osmométrique de la cellule végétale dans de l'eau pure ou dans une solution très diluée, l'eau, appelée par osmose à l'intérieur, dilue le suc cellulaire et accroît la pression interne : le volume ne peut augmenter que d'une manière insignifiante dans la plupart des cas. Lorsque le transfert du tissu hors de ses conditions naturelles est fait brusquement, sans que l'élément ait le temps de s'accommoder à ce nouveau milieu, la membrane cellulaire pourra éclater brusquement. C'est ce qui arrive pour les grains de pollen d'un grand nombre de plantes plongées dans l'eau.

Au contraire, lorsque l'appareil cellulaire est immergé dans une solution saline forte, son eau est drainée au dehors ; le volume diminue, la tension baisse, le suc cellulaire se concentre jusqu'à ce que sa tension osmotique équilibre la tension extérieure. Si les choses sont poussées loin, la rigidité

diminue et disparaît; la cellule s'affaisse, se flétrit; la plante se *fane*.

Le *fanement*, en effet, n'est pas autre chose. C'est une somme d'effets pareils qui se produit dans la jeune tige ou dans la fleur coupée ; privées de l'afflux des liquides nourriciers, elles se flétrissent et s'affaissent. Les mêmes phénomènes se produiraient si l'on plongeait ces végétaux dans une solution épaisse et concentrée d'une substance saline. Au contraire, en les immergeant, sans perdre de temps, dans une solution étendue ou dans l'eau pure, on leur fait reprendre leur turgescence, leur rigidité et leur fraîcheur.

On voit par là qu'une cellule végétale se gonfle ou se ratatine, que son volume tend à augmenter ou qu'il diminue, suivant que le liquide ambiant est plus ou moins dilué, que son pouvoir osmotique (pression osmotique) est plus petit ou plus grand que celui du suc cellulaire. La cellule ne reste immobile et au repos, elle n'est en équilibre parfait de volume et de pression, que pour une concentration convenable du liquide ambiant. Le liquide ambiant est alors *isosmotique* ou *isotonique* au suc cellulaire ; il a la même pression osmotique.

Ces observations suggèrent le moyen de juger si deux ou plusieurs solutions sont isotoniques au suc cellulaire, et, par suite, isotoniques entre elles. Il suffira d'y plonger une cellule végétale ; celle-ci devra y conserver exactement le même volume : elle ne devra pas diminuer ; elle ne devra pas avoir de tendance à augmenter. En concentrant ou en diluant les solutions, il sera facile de les amener à cet état.

On a donc là, dans la mesure des volumes cellulaires, un moyen (théorique tout au moins) d'apprécier l'égalité des pressions osmotiques, et par conséquent de les mesurer.

Mais l'augmentation de volume, limitée par l'inextensibilité de la membrane cellulaire, ne peut être, dans la plupart des cas, qu'extrêmement petite ou nulle, et par conséquent impossible à saisir. Quant à la diminution de volume, elle ne devient réellement constatable que lorsqu'elle a déjà atteint un certain degré.

A cette appréciation, malaisée et sans précision, de la variation du volume [dont nous verrons que l'on a essayé de faire usage en physiologie animale (1)[, Hugo de Vries en a substitué une autre, fondée sur le fait, qu'il a découvert, de la *plasmolyse*.

56. Appréciation de l'isosmose (isotonie), par la constatation de la plasmolyse. — Si, une cellule végétale étant en équilibre osmotique avec le milieu ambiant, on dilue celui-ci par addition d'eau, la pression interne augmente ; la membrane plasmique sera poussée plus fortement contre la paroi cellulaire ; le volume augmentera peu ou point du tout, à cause de la résistance de la membrane cellulosique. L'observateur examinant au microscope n'apercevra aucun changement apparent.

Au contraire, si l'on concentre le liquide ambiant, aussi peu que l'on vou-

(1) Hématocrite de S. G. Hedin.

dra, de l'eau sera appelée au dehors de la cellule et il se manifestera aussitôt une tendance à l'affaissement de la masse protoplasmique et à son retrait. Le sac protoplasmique, tout à l'heure adhérent à la membrane cellulaire, tend à s'en détacher ; et il s'en détache en effet sur quelque point. C'est ce retrait qui constitue la *plasmolyse.*

Ce retrait, ce décollement des deux membranes est un phénomène facile à distinguer. Il marque le moment où le liquide ambiant cesse d'être en équilibre osmotique avec le suc cellulaire ; il précise, par conséquent, l'instant où cet équilibre existait encore. Que l'on augmente progressivement la

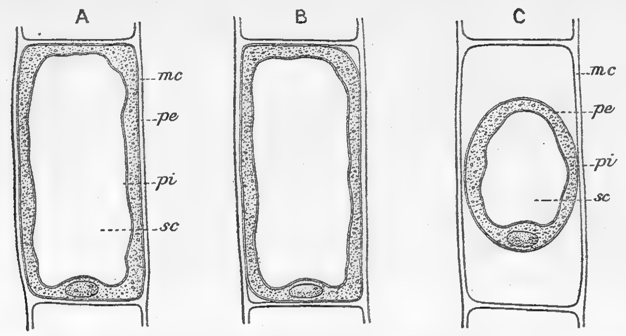


Fig. 440. — Cellule d'une racine de *Zea Mays* : A, dans l'eau ; B, dans une solution plasmolysante de nitrate de potasse à 2,3 p. 100 ; début de la plasmolyse dans l'angle supérieur droit ; C, plasmolyse marquée dans la solution à 5 p. 100 (d'après Pfeffer). Gr. = 375/1. — *mc*, membrane cellulaire. — *pe*, membrane plasmique externe. — *pi*, membrane plasmique interne, tonoplaste. — *sc*, suc cellulaire, vacuole centrale.

concentration du liquide où l'on observe la cellule végétale, en y ajoutant de plus en plus de substance, il vient un moment où l'on saisit le décollement indicateur. C'est le moment où cesse l'isosmose. *Le début de la plasmolyse, observée en employant des solutions de concentration croissante, est l'indication du moment où l'isotonie est obtenue.*

Si le liquide ambiant continue à se concentrer ou si, par quelque autre moyen, la cellule végétale continue à perdre de l'eau, le phénomène de la *plasmolyse* se caractérise et se poursuit : le sac protoplasmique se détache progressivement de la membrane cellulaire sur toute son étendue et forme alors une sorte de ballon, flottant à l'intérieur de l'enveloppe cellulosique, qui est trop rigide pour en suivre le mouvement. Tel est l'état de la *cellule plasmolysée*, et, en général, des tissus fanés. Le liquide ambiant est alors dit *plasmolysant.*

57. *Choix des indicateurs.* — Grâce à ces observations de *plasmolyse débutante*, H. de Vries a pu fixer les degrés de concentration que doivent présenter un grand nombre de solutions pour avoir le même pouvoir osmotique. Il suffit de bien choisir les plantes dont les cellules serviront d'indicateurs. Les plantes dont le protoplasma est coloré facilitent l'observation parce qu'elles permettent mieux d'apercevoir, par contraste, le retrait de la masse colorée tranchant sur la liqueur claire.

S'il s'agit de solutions de sucres ou d'hydrates de carbone, on s'adresse à l'*Elodea canadensis* ou au *Tradescantia discolor* dont le suc cellulaire est coloré. Pour ce dernier, on examine des coupes minces de l'épiderme, prélevé dans le voisinage de la nervure médiane.

Pour les liqueurs acides, on emploie le *Begonia manicata*, ou encore le *Curcuma rubricaulis*. Le suc cellulaire du *Begonia* est normalement acide ; il doit son acidité à l'oxalate acide de potassium qui y existe, à peu près à l'état de concentration décinormale $\left(\frac{1}{10}\right.$ du poids moléculaire, en grammes, par litre d'eau$\left.\right)$. On examine les écailles rouges qui recouvrent le pétiole au voisinage du limbe de la feuille, et plus spécialement l'épiderme de la face supérieure de ces feuilles.

On emploie très fréquemment, à cause de sa commodité, le *Tradescantia*. On pratique des coupes minces du tissu choisi. On les distribue dans une série de verres renfermant 5 à 10 centimètres cubes de la solution à étudier, à des états de concentration croissante de centigramme en centigramme pour un litre. On les examine après qu'elles y ont séjourné d'une demi-heure à une heure et demie, et l'on recherche celui des verres où la plasmolyse a débuté. On connaît ainsi la concentration de la solution isotonique au suc cellulaire.

58. ***Régression de la plasmolyse. Absorption.*** — Il faut, pour que la détermination puisse inspirer confiance, qu'il n'y ait point de *régression de la plasmolyse*, c'est-à-dire que l'état de retrait observé se maintienne longtemps sans changement. Dans beaucoup de cas, cette condition n'est pas remplie ; le décollement n'est que passager ; le protoplasma repoussé de la membrane cellulaire s'y applique de nouveau ; la situation normale se rétablit. Ce fait indique une modification du contenu cellulaire par le liquide, milieu ambiant, ou l'inverse. Or, on ne peut supposer un changement appréciable du liquide ambiant par les faibles quantités d'eau ou de substances qui peuvent sortir des cellules. La différence des pouvoirs osmotiques des liqueurs *intus et extra* aura donc diminué par suite d'une pénétration de substance à l'intérieur de la cellule. Le pouvoir osmotique du contenu cellulaire aura augmenté. La substance plasmolysante du milieu s'y sera introduite. Il y aura eu absorption.

La régression de la plasmolyse démontre donc qu'il y a eu absorption ; que la membrane plasmique n'est par conséquent pas rigoureusement imperméable à la substance plasmolysante qui a, en effet, pénétré de dehors en dedans. On n'est pas dans les conditions d'une osmose typique. Les observations de ce genre, en faisant connaître la fréquence et l'étendue de ces phénomènes de régression, ont appris dans quelle mesure la membrane plasmique est semiperméable et quelles sont les substances auxquelles elle permet de diosmoser.

59. ***Variations du pouvoir osmotique de la cellule par suite des mutations nutritives.*** — La pression osmotique des cellules diverses peut

être ainsi évaluée en solution équivalente de chlorure de sodium ou d'azotate de potasse (solution de 1 à 8 p. 100 en général); on peut l'estimer ensuite en valeur absolue, en colonne de mercure. Cette pression est due aux diverses substances en solution dans le suc cellulaire, selon leur aptitude osmotique respective. Par exemple, dans un suc cellulaire, les acides malique, tartrique, citrique, oxalique ont, à concentration égale, une action osmotique trois à cinq fois supérieure à celle du sucre, et celui-ci une action six à sept fois plus grande que les colloïdes, gomme arabique, etc... D'autre part, en recueillant, par expression, ce suc cellulaire plus ou moins pur, on peut connaître la nature des substances qui y sont contenues. En combinant ces deux espèces de notions, on arrive à se rendre compte des faits suivants : La moitié de la pression osmotique, dans la betterave, est due au sucre de cannes; dans l'oignon de cuisine, c'est au glucose. Dans les feuilles de rose, les 80 p. 100 de la pression osmotique sont dus au glucose; 41 p. 100 sont dus au nitrate de potasse dans l'*Helianthus tuberosus*; 54 p. 100 de la pression reviennent au chlorate de potasse dans les pétioles du *Gunnera scabra*, 62 p. 100 à l'acide oxalique dans les pétioles de *Rheum*, etc... (Pfeffer).

Il est à remarquer que les cellules voisines ont des pressions osmotiques voisines, mais que ces pressions peuvent être réalisées par des produits différents. Il faut encore observer que les plus simples mutations peuvent exercer des modifications considérables sur la turgescence cellulaire et les phénomènes qu'elle commande. Par exemple, la simple condensation de deux molécules de glucose en une molécule de saccharose abaisse de moitié la pression osmotique. Au contraire, les colloïdes, albumine, etc., peuvent s'accumuler sans influencer sensiblement la tension intérieure.

60. Résultats fournis par la méthode physiologique de de Vries. Vérification de la loi des concentrations et de la loi des températures. — On a étudié et comparé, par la méthode de la plasmolyse, un très grand nombre de corps. On a déterminé à quel degré de concentration les solutions de ces substances devenaient isotoniques.

Il ne s'agissait plus de savoir l'influence des concentrations *pour une même substance.* Les expériences de Pfeffer l'avaient fait connaître : *le pouvoir osmotique est proportionnel à la concentration*; les déterminations nouvelles n'ont fait que confirmer cette loi fondamentale.

La loi des températures, à savoir que : *le pouvoir osmotique est proportionnel à la température absolue,* avait échappé à Pfeffer comme à de Vries. Ce dernier vit seulement que la pression croissait avec la température et que des solutions, isotoniques à une température donnée, le restaient à toute autre (1).

Les expériences de De Vries ont mis sur la trace d'une troisième loi tout à fait fondamentale, qui fait connaître, *pour des substances différentes,* la relation des pouvoirs osmotiques de leurs solutions. Elle relie la pression

(1) Dans tout ce qui suit, il est bien entendu, qu'à moins d'indication expresse du contraire, il est question de la pression osmotique à la température constante de 15°.

osmotique aux constantes chimiques des corps, aux poids moléculaires ; c'est la *loi des concentrations moléculaires*. Mais ici, il faut distinguer.

61. Distinction essentielle des solutions en deux classes : Substances organiques non électrolysables et sels minéraux électrolysables. — L'examen des résultats numériques montre, parmi les substances étudiées au point de vue osmotique, une première distinction à faire. Il y a d'un côté toutes les substances organiques, auxquelles se joignent seulement un petit nombre de sels minéraux. C'est un premier groupe que l'on peut appeler en quelque sorte *normal*. D'autre part, la majorité des sels minéraux forment une seconde classe, en quelque sorte *aberrante*.

Il faut ne pas perdre de vue cette distinction essentielle : d'une part les substances organiques (non soumises à l'électrolyse) qui forment le type régulier ; d'autre part, les sels minéraux (soumis à l'électrolyse) qui ne rentrent dans la règle que sous certaines conditions. Les premières seules suivent sans restriction la loi des concentrations moléculaires. Nous ne parlerons d'abord que de celles-ci.

62. Loi des concentrations moléculaires pour les substances organiques non électrolysables. — Au moyen de la plasmolyse, on a déterminé pour des solutions de diverses substances, à savoir : sucre de canne ; sucre interverti ; acides : malique, citrique, oxalique ; glycérine ; les *concentrations isotoniques*, c'est-à-dire les degrés de concentrations des solutions de ces substances qui sont isotoniques.

On convient quelquefois (Voy. n° **47**, 6°) d'exprimer la concentration d'une solution par le nombre de grammes du corps dissous qui existe dans dix litres de solution. Nous avons vu qu'on l'exprimait aussi par la quantité qui existe dans un litre ou encore dans 100 centimètres cubes de solution. On a alors des nombres dix fois plus petits ou mille fois plus petits. Il importe peu : c'est un simple déplacement de virgule. La raison pour laquelle Pfeffer a pris le volume de dix litres et exprimé la concentration par le nombre de grammes y contenus, c'est que, parmi les corps de la liste précédente, l'un des principaux est l'acide oxalique — que cet acide est employé aux déterminations d'acidité, et que la solution d'acide oxalique, qui sert de base à la méthode acidimétrique, est la solution décinormale, c'est-à-dire celle qui contient le poids de l'équivalent (90 grammes) dans les dix litres.

On a donc fixé les nombres de grammes des différents corps qui doivent être dissous dans 10 litres de solution pour que celles-ci soient isotoniques entre elles. On a constaté qu'il y avait *isotonie* entre des solutions contenant dans 10 litres les poids suivants :

SÉRIE I. — Coefficient isotonique = 2.

1er Groupe. — *Corps organiques.*

Sucre de canne, $C^{12}H^{22}O^{11}$	342 grammes.
Sucre interverti, $C^6H^{12}O^6$	180 —
Acide malique, $C^4H^6O^5$	134 —
— tartrique, $C^4H^6O^6$	150 —
— citrique, $C^6H^8O^7$	192 —
— oxalique, $C^2H^2O^4$	90 —
Glycérine, $C^3H^8O^3$	92 —

Il convient d'y ajouter : l'urée, l'asparagine, le lactose.

La pression osmotique exercée par la solution contenant ces nombres de grammes (342, 180, 134, etc.) dans les dix litres est égale pour toutes ces substances à : $\pi = 179^{cc},1$ de mercure, ou à 2,35 atmosphères.

2e Groupe. — *Sels alcalino-terreux.* Formule R″, A″ (1).

Malate de magnésium, $MgC^4H^4O^5$	156 grammes.
Sulfate de magnésie, $MgSO^4$	120 —

Les nombres qui expriment les concentrations isotoniques sembleraient n'avoir aucune signification, si nous n'avions pris soin de choisir convenablement notre étalon de mesure. Ils en ont une tout à fait évidente, grâce à ce choix. On voit qu'ils représentent les poids des éléments qui répondent aux formules de ces corps, c'est-à-dire à leur poids moléculaire. Le sucre de canne $C^{12}H^{22}O^{11}$, a précisément pour poids moléculaire 342 grammes ; le sucre de glucose, 180 ; l'acide tartrique, 150 ; l'acide oxalique, 90 ; la glycérine, 92 ; le sulfate de magnésium, 120. Ce sont les chiffres du tableau : ce sont les poids moléculaires. Les solutions sont précisément les solutions *décinormales.*

On ne connaît pas en grammes et en centimètres cubes le poids absolu ni le volume absolu des molécules, c'est-à-dire des plus petites parties d'un corps composé, pouvant exister à l'état libre, avec ses caractères et ses propriétés. (La décomposition poussée plus loin serait une décomposition chimique, en atomes.) Mais la chimie fait connaître leurs valeurs relatives. Elle choisit précisément les formules de manière qu'elles expriment, pour chaque corps, un poids qui, s'il n'est pas celui même de la molécule, en est le même multiple.

La formule d'un composé fait donc connaître immédiatement son *poids moléculaire relatif* en grammes, si l'on se rappelle que les symboles H, C, O, etc., représentent des poids de 1, 12 et 16 grammes, etc.

Ces poids, 342 grammes, 180 grammes, 92 grammes, etc., ne sont pas naturellement les poids d'une molécule de sucre, de glucose, de glycérine, etc., comme on le dit cependant, par abréviation ; mais ils contiennent le même nombre de fois le poids véritable d'une molécule de ces substances ; ils sont les poids d'un *même nombre de molécules* ; ils sont *équimoléculaires.* Les solutions isotoniques de la liste précédente contiennent donc, dans 10 litres, le même nombre de molécules du corps dissous. Ce sont des solutions équimoléculaires. Le résultat s'exprime donc de la manière suivante :

Les solutions équimoléculaires ont la même pression osmotique.

Cette loi de la concentration moléculaire a une haute portée. Les conséquences vont en apparaître dans un instant. Pour le moment, il est utile d'en varier l'expression. Le fait qu'elle exprime est le suivant : Séparées de l'eau par une membrane semiperméable (c'est-à-dire perméable à l'eau seulement), les solutions des substances organiques les plus diverses développent toutes la même pression osmotique, en grandeur, si elles contiennent le même nombre de molécules de la matière organique par litre ; et, si elles en contiennent des nombres différents, la pression, d'après la loi de Pfeffer, est proportionnelle à ces nombres. Le nombre seul des molécules, et non leur qualité, intervient dans la pression osmotique. En d'autres termes :

Toute molécule, quelle qu'elle soit, exerce en dissolution la même pression osmotique.

Telle est, dans son élégante simplicité, la loi fondamentale de l'osmose.

(1) R″, métal divalent ; A″, acide bibasique.

63. Conséquence de la loi des concentrations moléculaires : Analogie des corps dissous avec les corps gazeux. — La liaison de la force osmotique au nombre des molécules a été un trait de lumière. Tous les problèmes les plus profonds que soulève le jeu de cette force, l'une des plus générales de la nature, en ont été éclairés subitement. Les tables de chiffres qui résument les expériences de Dutrochet, de Pfeffer, de H. de Vries, prennent une signification remarquable. Une analogie fondamentale, impossible à apercevoir tant que l'on comptait les concentrations en poids et les compositions en centièmes, se dévoile et s'impose à l'esprit. La pression osmotique est indépendante de la nature du corps dissous : elle est même indépendante du dissolvant, comme l'a fait remarquer Van t'Hoff. Elle ne dépend que du nombre des molécules. La pression osmotique est proportionnelle au nombre des molécules de substance réparties dans un volume donné. Chaque molécule, quelle qu'elle soit, exerce la même pression osmotique.

Or, cet énoncé rappelle inévitablement la loi des gaz, le principe d'Avogadro : « La pression gazeuse est proportionnelle au nombre des molécules dans un volume donné. Chaque molécule, quelle qu'elle soit, exerce la même pression gazeuse. »

On est amené ainsi, par la voie expérimentale, à apercevoir une analogie fondamentale entre les pressions osmotiques et les pressions gazeuses, entre les substances dissoutes répandues dans un solvant et s'étendant jusqu'à ses limites, et les gaz répandus dans l'espace éthéré.

C'est cette analogie qui s'imposa à l'esprit de Van t'Hoff et devint le point de départ de son ingénieuse et profonde théorie. Nous verrons plus loin qu'il assimila la loi des concentrations à la loi de Mariotte ; il constata que la loi des températures est celle même de Gay-Lussac et Regnault. Les mesures de Pfeffer et de De Vries concordent parfaitement avec ces lois. L'assimilation se trouve donc entièrement justifiée. Dès lors, la formule des gaz parfaits s'applique aux solutions.

L'assimilation du corps dissous à un gaz semble donc parfaitement légitimée, au point de vue expérimental. Quelles que soient les raisons que nous en puissions concevoir, la manière dont nous puissions expliquer l'identification de ces deux états matériels, substance dissoute d'une part, substance vaporisée ou gaz, d'autre part, leur analogie semble inébranlablement établie. Elle est fondée sur des concordances numériques, résultant de mesures précises ; le hasard n'y a point de part.

On remarquera que nous n'avons parlé jusqu'ici que des solutions des substances organiques — et d'un très petit nombre de sels minéraux alcalino-terreux, dérivés d'une molécule d'acide. — Les résultats numériques, les conséquences qui en découlent, les inductions qu'ils suggèrent ne valent que pour cette catégorie de corps. Pour eux, les pressions osmotiques sont réellement proportionnelles au poids moléculaire de la substance dissoute dans un égal volume de solution. Chaque molécule d'un de ces corps équivaut à une molécule d'un autre.

64. La grande majorité des solutions salines paraît faire excep-

tion à la loi des concentrations moléculaires. — La grande majorité des corps solubles, des sels minéraux, échappe à la loi des concentrations moléculaires, d'une manière apparente. C'est ce qu'a bien vu De Vries. Les pressions osmotiques des solutions salines peuvent être des nombres quelconques, sans rapport avec le poids moléculaire de la substance dissoute. Les molécules de ces corps ne s'équivalent pas entre elles; elles n'équivalent pas à celles de la série précédente.

Ce fait, qui remet en question les résultats précédents, paraît inexplicable. On est amené à se demander s'il faut renoncer aux relations d'imposante simplicité aperçues précédemment et valables pour une si nombreuse série de substances, et s'il peut y avoir, parmi les solutions aqueuses, deux classes dissemblables par des traits si profonds.

65. Distinction des solutions étendues et des solutions concentrées. — De Vries ne tarda pas à s'assurer que la discordance n'était pas aussi profonde qu'il semblait. Il fût amené (et cela pour des raisons tirées des études faites dans un autre domaine de la physique, la cryoscopie) à établir une distinction parmi ces solutions salines, apparemment aberrantes. Il faut mettre à part les solutions concentrées qui, jusqu'à nouvel ordre, vont nous sembler, en effet, échapper à toute règle — et les *solutions étendues.*

Déjà, à propos des solutions de la première série, nous avons vu que la loi des concentrations ne s'appliquait rigoureusement qu'aux solutions qui ne sont pas trop riches en matière dissoute (Voy. n° ***50***). C'est donc seulement aussi pour les solutions étendues que valent les conséquences de cette loi. En particulier, l'analogie des solutions avec les gaz ne vaut rigoureusement que pour les solutions étendues.

Avec la seconde série de solutions (majorité des solutions salines), la distinction est encore bien plus nécessaire. Si les solutions concentrées ne suivent aucun ordre apparent, les solutions moyennement étendues, au contraire, obéissent à une loi très simple (et grossièrement approximative) [Voy. n° ***89***] mise en lumière par de Vries, la *loi des coefficients isotoniques.*

66. Solutions salines étendues. Loi des coefficients isotoniques moyens. — *a.* SÉRIE A COEFFICIENT ISOTONIQUE $\frac{2}{3}$ (COEFFICIENT ENTIER, 3). SELS ALCALINS. Formule R′, A′ (1). — Les expériences plasmolytiques de De Vries ont montré que les sels minéraux pouvaient se partager en quatre séries. Dans toutes, les pressions osmotiques sont plus fortes qu'elles ne devraient être si la loi de concentration moléculaire s'y appliquait sans réserve. Ces pressions ne répondent pas au nombre de molécules qui existent dans la solution — ou que l'on croit y exister — mais à des nombres plus grands.

Par exemple, considérons l'azotate de potasse $KAzO^3$. Son poids moléculaire est $(K + Az + 3O) = 101$. La solution étendue qui, pour 10 litres, contiendrait 101 grammes, devrait exercer, si le corps n'était pas aberrant, la même pression osmotique que les corps de la première série (Voy. n° ***62***),

(1) R′, métal monovalent; A′, acide monobasique.

c'est-à-dire une pression de $179^{cm},1$ en colonne de mercure ou de 0,235 d'atmosphère. Elle devrait être *isotonique* à celles de la première série. Elle ne l'est pas en réalité. Au lieu d'une pression de $179^{cm},1$ de mercure, elle exerce une pression osmotique de $268^{cm},6$ — ou de 3,52 d'atmosphère au lieu de 2,35 d'atmosphère. — Elle n'est pas isotonique aux précédentes ; elle est *hypertonique* à celles-ci, ou, comme on le dit encore d'une manière barbare, elle est *hyperisotonique* par rapport aux solutions de la première série.

On remarquera qu'il suffit de multiplier la pression osmotique correspondant aux corps de la première série par la fraction simple $\frac{3}{2}$ pour avoir la pression osmotique réelle de l'azotate de potasse.

On a :

$$179^{cm},1 \times \frac{3}{2} = 268^{cm},6.$$

Le nombre $\frac{3}{2}$, facteur par lequel il faut multiplier la pression osmotique théorique (celle qui existerait si le corps suivait rigoureusement la loi de concentration moléculaire) est le *coefficient isotonique* du nitrate de potasse.

Pour donner à ces résultats toutes les expressions possibles, nous dirons que le pouvoir osmotique du nitrate de potasse est majoré. A concentration moléculaire égale [1 molécule-gramme (1) dans 10 litres], il devrait être le même que dans la première série : il est plus grand. Cette solution devrait être isotonique aux solutions de sucre contenant 1 molécule-gramme : elle leur est *hypertonique*. Il faut diminuer la concentration du nitrate pour arriver à l'équilibre; prendre une concentration qui serait les $\frac{2}{3}$ du poids moléculaire dans 10 litres. On peut dire encore que $\frac{2}{3}$ de molécule de nitrate équivalent à 1 molécule des corps de la première série, ou 2 molécules de nitrate à 3 molécules de sucre.

Il y a toute une série de sels qui sont, approximativement, dans la même situation que l'azotate de potasse. Ce sont des sels alcalins d'acides monobasiques. Leur coefficient isotonique vrai oscille, pour la solution décinormale, autour du monde $\frac{3}{2}$.

Série II. — Coefficient isotonique : $\frac{3}{2}$ ou 3.

2e Groupe. — *Sels alcalins à un atome de métal.* Formule: R'A.

Azotate de potasse, $KAzO^3$	101 grammes.
Chlorure de potassium, KCl	74,5 —
Acétate de potassium, $KC^2H^3O^2$	98 —
Citrate acide de potassium, $KH^2C^6H^5O^7$	130 —
Azotate de soude, $NaAzO^3$	85 —
Chlorure de sodium, NaCl	58,5 —
Chlorhydrate d'ammoniaque, AzH^4Cl	53,5 —

Il convient d'y ajouter : cyanure, bromure, iodure de potassium, chlorate de potassium.

(1) On appelle molécule-gramme le poids moléculaire exprimé en grammes.

La pression osmotique de la solution décinormale (contenant les poids moléculaires 101, 74,5, 98, etc., dans 10 litres de solution), au lieu d'être égale à 179cm,1 de mercure ou 2,35 d'atmosphère, est plus grande. Elle est 268cm,6 ou 3,52 d'atmosphère, avec une approximation de $\frac{1}{7}$ à $\frac{1}{15}$.

Elle est égale à la précédente $\times \frac{3}{2}$.

b. Série a coefficient isotonique $\frac{4}{2}$. Sels alcalins a 2 atomes de métal par molécule. Formule : 2 R′,A″. — Sels alcalino-terreux a 2 molécules d'acide. Formule : R″, 2A′ (1). — Une nouvelle série, que nous noterons série III, comprend des sels qui ne sont pas isotoniques aux précédents à concentration moléculaire égale. Leur pression osmotique est majorée. La solution décinormale (solution étendue qui contiendrait le poids moléculaire ou molécule-gramme dans 10 litres), au lieu d'avoir une pression osmotique égale à 179cm,1 en colonne de mercure, ou à 2,35 en atmosphère développe, en réalité, une pression double, ou 358c,2m en colonne de mercure, 4,70 d'atmosphère. Le coefficient isotonique est 2. Une demi-molécule de ces corps équivaut osmotiquement à une molécule des corps de la 1re série, ou 1 molécule de ces corps à 2, ou encore 2 molécules à 4 des premières.

Série III. — Coefficient $\frac{4}{2}$. Coefficient entier, 4.

3e Groupe. — *Sels alcalins à deux atomes de métal* (2R′,A″).

Oxalate de potassium, $K^2C^2O^4$	166	grammes.
Sulfate de potassium, K^2SO^4	174	—
Phosphate de potassium, K^2HPO^4	174	—
Tartrate de potassium, $K^2C^4H^4O^6$	226	—
Malate de potassium, $K^2C^4H^4O^5$	210	—
Citrate acide de potassium, $K^2HC^6H^5O^7$	268	—

Il convient d'ajouter : carbonates de sodium et potassium, sulfates alcalins, sulfate de sodium, azotate de calcium.

La solution décinormale (poids moléculaire dans 10 litres), au lieu d'avoir une pression de 179cm,1 de mercure, comme dans la première série, ou $179{,}1 \times \frac{3}{2}$, comme dans la seconde, a, approximativement, une pression de 179cm, 1×2, en colonne de mercure. Soit 358cm,2 ou 4,70 d'atmosphère.

4e Groupe. — *Sels alcalino-terreux.*

Citrate de magnésie, $Mg^3(C^6H^5O^7)^2$ .... 450 grammes.

Sels aberrants (2 A′,R″).

Chlorure de magnésium, $MgCl^2$	94	grammes.
Chlorure de calcium, $CaCl^2$	110	—

La solution décinormale aurait une pression de 179cm,2 $\times$ 2,15 au lieu de 2.
Le coefficient isotonique serait 2,15.

(1) R′, métal monovalent ; R″, métal divalent ; A′, radical d'acide monobasique ; A″, radical d'acide bibasique.

On notera que les deux derniers sels, chlorure de magnésium et chlorure de calcium, sont anormaux. Le rapport n'est plus un nombre simple : c'est 2,15 au lieu de 2. Les observations ont porté, sans doute, sur des concentrations trop fortes.

c. Série a coefficient isotonique $\frac{5}{2}$. Sels alcalins a trois atomes de métal ($3R',A'''$). — La dernière série (série IV), comprend les sels alcalins à trois atomes de métal par molécule.

La solution décinormale de ces sels (solution étendue contenant le poids moléculaire dans 10 litres) aurait, approximativement, une pression osmotique de $447^{cm},7$; c'est la pression osmotique de la 1re série multipliée par le coefficient isotonique $\frac{5}{2}$. En atmosphères, ce serait 5,87.

Série IV.

Sels alcalins à trois atomes de métal par molécule ($3R',A'''$).

Citrate neutre de potasse, $K^3C^6H^5O^7$................ 306 grammes.
Citrate de lithium.................................

La solution décinormale aurait une pression de $447^{cm},7$ de mercure, soit $179,1 \times \frac{5}{2}$.

Résumé. — Les différents sels se laissent donc ranger en trois séries, dont les *coefficients isotoniques* sont respectivement, en moyenne,

$$\frac{3}{2}.\ 2.\ \frac{5}{2}.$$

Conclusion. — Si l'on veut embrasser tous les corps (en solution étendue), on peut dire qu'ils se rangent en quatre séries.

Les solutions équimoléculaires de ces corps, au lieu d'être isotoniques, ont des pressions osmotiques différentes dans chaque série. Leurs pressions sont entre elles comme les nombres

$$1.\ \frac{3}{2}.\ 2.\ \frac{5}{2},$$

ou, plus simplement, comme les nombres 2, 3, 4, 5. Ces nombres sont dits les *coefficients isotoniques moyens,* respectifs des séries. Les corps organiques auraient pour coefficient conventionnel 2; les autres respectivement 3, 4 et 5.

Théoriquement, et par définition, *les coefficients isotoniques expriment les pressions osmotiques des solutions équimoléculaires des différents corps* ; ou, encore, *les rapports dans lesquels sont les pressions osmotiques de ces substances rapportées à des quantités équimoléculaires.*

Pour les avoir en nombres entiers, on prend conventionnellement, pour les composés organiques, le coefficient 2, c'est-à-dire qu'on leur attribue une pression osmotique double de la pression absolue. Cette convention ne change rien aux rapports.

En fait, les valeurs qui leur sont attribuées, 3, 4, 5, ne sont que très grossièrement approchées (Voy. n° *89*). Le tableau (n° *90*) donne les valeurs expérimentales vraies qui doivent êtres substituées à ces coefficients moyens.

67. *Règle mnémonique des coefficients isotoniques.* — H. de Vries a donné une règle mnémonique qui permet de savoir à quelle série appartient un corps donné, et, par conséquent, quel est son *coefficient isotonique.*

Il suffit d'admettre les deux règles suivantes : 1° le coefficient isotonique d'un sel est égal à la somme des coefficients partiels des composants ; 2° chaque molécule d'acide a, dans les combinaisons, le même coefficient partiel égal à 2; chaque atome de métal a aussi le même coefficient, à savoir 1 pour les métaux alcalins, 0 pour les métaux alcalino-terreux.

Application. — Soit à savoir le coefficient isotonique du sulfate de potasse, K^2SO^4.

La molécule d'acide 2 + 2 atomes de métal alcalin, 2 = 4.
Pour le sulfate de magnésie : molécule d'acide 2 + atome métal, 0 = 2.
Pour l'oxalate neutre de potassium, $K^2C^2O^4$: 2 + 2 = 4.
Pour l'oxalate acide de potassium, KHC^2O^4, on a : 1 + 2 = 3.

68. *Application. Moyen de connaître immédiatement la pression osmotique d'une solution quelconque d'un sel quelconque.* — La connaissance des coefficients isotoniques permet de déterminer immédiatement la composition d'une solution qui doit être isotonique à une solution donnée. C'est là une opération dont l'occasion se présente très fréquemment. On peut tout aussi facilement déterminer la pression osmotique d'une solution donnée.

Par exemple : Quelle est la pression osmotique d'une solution contenant 3 grammes de phosphate de potassium K^2HPO^4, dans 100 centimètres cubes?

La solution qui contient 3 grammes dans 100 centimètres cubes contiendrait 30 grammes dans 1 litre et 300 grammes dans 10 litres. D'autre part, le phosphate de potassium K^2HPO^4, d'après la règle précédente, a pour coefficient isotonique 4, c'est-à-dire, par rapport aux corps de la première série, $\frac{4}{2}$. La solution déci normale renfermant le poids moléculaire ($K^2HPO^4 = 174$) dans 10 litres aura donc, pour pression osmotique, $179^{cm},1$ de mercure $\times 2 = 358^{cm},2$. Mais, d'après la loi des concentrations, la solution qui contient 174 grammes dans 10 litres ayant la pression de $358^{cm},2$, la solution contenant 300 grammes dans les 10 litres aura une pression proportionnelle, soit $\frac{300 \times 358,2}{174}$ en centimètres de mercure. — Soit $617^{cm},5$.

Il suffit de connaître le coefficient isotonique — la règle précédente le donne : le poids moléculaire du corps, on l'a par les tables chimiques — et de se rappeler que la pression osmotique de la solution décinormale de la première série est $179^{cm},1$ de mercure.

Cas général. — Le calcul général est facile : *Soit à connaître la pression osmotique* π *d'une solution à* p *p. 100* (p *gr. dans 100 c. c.*) *d'un sel ayant pour poids moléculaire* M *et pour coefficient isotonique entier* K.

La solution à p grammes pour 100 centimètres cubes est la même que la solution $100\,p$ dans 10 litres. D'autre part, la solution décinormale (renfermant M dans 10 litres) a pour pression osmotique celle des solutions de la première série, soit $179^{cm},1$ de mercure $\times \frac{K}{2}$, d'après la définition même du coefficient isotonique, K. Les pressions osmotiques étant proportionnelles aux concentrations, la pression osmotique cherchée π est à la pression de la solution décinormale, $179,1 \times \frac{K}{2}$, comme $100\,p$ est à M.

$$\frac{\pi}{179,1 \times \frac{K}{2}} = \frac{100\,p}{M} \quad \text{d'où} \quad \pi^{cm} = \frac{17910.\,p.\,K}{2\,M}. \qquad (1)$$

La formule (1) donne immédiatement le résultat cherché.

69. Autre application. Constituer une solution d'un corps, isotonique à une autre solution quelconque. — Soit une solution d'un corps de poids moléculaire M, de coefficient isotonique K de concentration p p. 100 (p gr. dans 100 c. c. de solution). Quel poids p' d'un second corps M′, de coefficient isotonique entier K′, faut-il prendre pour faire une solution (dans 100 c. c.) isotonique ?

Les solutions devant avoir même pouvoir osmotique, on écrira

$$\frac{17910 \times p \times k}{M} = \frac{17910 \times p' \times k'}{M'}$$

d'où

$$p' = p \cdot \frac{M'}{M} \cdot \frac{K}{K'}. \qquad (2)$$

On peut poser directement cette formule. En effet :

Les solutions équimoléculaires de deux corps, au lieu d'exercer la même pression, exercent des pressions qui sont dans le rapport des coefficients isotoniques K, K′, d'après la définition de ces coefficients. Les poids M et M′ exercent des pressions respectivement égales à K et K′. Il faut donc, pour faire des solutions isosmotiques, prendre des fractions de ces poids d'autant plus grandes que les coefficients isotoniques sont plus petits et inversement; en d'autres termes, pour constituer ces solutions isotoniques, il faut prendre des fractions du poids moléculaire, inversement proportionnelles aux coefficients isotoniques

$$\frac{\frac{p'}{M'}}{\frac{p}{M}} = \frac{K}{K'}.$$

C'est la formule (2).

CHAPITRE II

ÉTUDE THÉORIQUE DE L'OSMOSE

SOMMAIRE. — **Résumé des résultats expérimentaux, 70. — § 1. Solutions des substances organiques, non électrolytes, 71-81. — § 2. Solutions des substances électrolytes, 82-89. — § 3. Tableau des données osmotiques expérimentales, 90-91.**

70. Résumé des résultats expérimentaux. — Les expériences de Pfeffer et de H. de Vries fournissaient un tableau de valeurs numériques. Elles faisaient connaître la pression osmotique d'un grand nombre de solutions, en grandeur relative et absolue ; cela, en fonction de la concentration et de la température. La loi des concentrations pondérales avait trouvé sa formule ; celle des températures n'avait pas eu la sienne, non plus que la loi des concentrations moléculaires. C'est à Van t'Hoff qu'il appartenait de les dégager.

La pression osmotique est proportionnelle à la concentration ; elle est proportionnelle à la température absolue : elle est proportionnelle à la concentration moléculaire. Les solutions équimoléculaires ont le même pouvoir osmotique, c'est-à-dire que toute molécule, quelle qu'elle soit, exerce, en dissolution, la même pression osmotique.

Ces énoncés résument les faits : ils sont indépendants de toute théorie, et conséquemment de celle même qui a conduit Van t'Hoff à les formuler, c'est-à-dire de l'idée de l'assimilation des corps dissous aux corps gazeux. Celle-ci deviendrait insoutenable que les lois précédentes n'en conserveraient pas moins leur expression.

Les trois lois fondamentales ne sont, en leur entier, applicables qu'aux solutions des seules substances organiques. C'est là une restriction essentielle. De plus, il faut que les solutions ne soient pas trop concentrées.

Quant aux solutions des autres corps, à savoir : sels minéraux et organiques, acides minéraux, bases minérales, elles obéissent aux deux premières lois, non à la troisième. Toutefois, lorsqu'il s'agit de solutions étendues, la pression osmotique est proportionnelle à la concentration moléculaire multipliée par un facteur de correction, le *coefficient isotonique* de De Vries qui est un nombre simple.

On peut remarquer, et cette remarque aura ses conséquences plus tard, que les substances de ce dernier groupe sont précisément celles qui subissent la décomposition électrolytique, tandis que celles qui suivent exactement les trois lois échappent à l'électrolyse, ne sont pas décomposables par le courant et ne le conduisent pas. Il y a lieu de considérer à part les solutions des non-électrolytiques et celles des corps électrolytiques.

§ I. — SOLUTION DES SUBSTANCES ORGANIQUES, NON ÉLECTROLYTES

Sommaire. — **71**. Identification des corps dissous avec les gaz, par Van t'Hoff. Dissolution, diffusion comparées à fusion, vaporisation. — **72**. Les solutions de concentration moyenne sont comparables à des vapeurs au voisinage de leurs points de liquéfaction. — **73**. Vérification expérimentale. — **74**. Vérification de la loi des températures par les déterminations de Pfeffer, de Vries, Donders et Hamburger. Expériences de Soret. — **75**. Les lois de l'osmose. — **76**. Formule des solutions ; constante des solutions, et comparaison avec la formule des gaz et la constante des gaz. — **77**. Autres expressions de la formule qui donne la pression osmotique. — **78**. Formules exprimant la pression osmotique en fonction de la concentration en volume C, et en poids C′ et C″. — **79**. Démonstration théorique. Indication générale de la marche suivie : *a*. Cycle de transformation réversible. — *b*. Démonstration rationnelle de la loi des températures. — *c*. Identité de la pression osmotique et de la pression gazeuse. — **80**. Examen de la théorie de Van t'Hoff. Difficulté : elle ne donne pas une image immédiate de la pression osmotique. — **81**. Critique du principe de Van t'Hoff. Mécanisme de la pression osmotique.

71. Identification des solutions avec les gaz, par Van t'Hoff. — Dissolution, diffusion comparées à fusion, vaporisation. — Nous avons déjà fait remarquer (nº *63*) que les lois fondamentales de la pression osmotique étaient celles mêmes qui régissent la pression gazeuse. La loi des températures est la loi de Gay-Lussac. — La loi des concentrations moléculaires, c'est le principe d'Avogadro. La pression osmotique pour des

corps différents ne dépend pas de la nature du corps dissous, mais seulement du nombre des molécules dans un volume donné, comme la pression gazeuse ne dépend pas de la nature du gaz, mais seulement du nombre de molécules dans un volume donné. La loi des concentrations pondérales peut être comparée à la loi de Mariotte : pour une même masse de corps dissous, étendue dans des quantités différentes de dissolvant, les pressions osmotiques sont inversement proportionnelles, à égalité de température, aux volumes occupés par cette masse. En effet, les divers volumes de solution occupés par la même masse de corps dissous expriment bien les concentrations. La substance dissoute offre donc des analogies essentielles avec la substance gazeuse.

L'hypothèse de Van t'Hoff consiste à transformer ces analogies si fortes en assimilation complète.

Van t'Hoff admet donc que la substance dissoute existe dans l'eau à l'état de gaz ou de vapeur et que ses propriétés sont réellement celles d'un gaz ou d'une vapeur. Et, en effet, demandons-nous à quel autre état elle pourrait être.

En général, le phénomène de *dissolution* s'accompagne, ou, plutôt, est suivi d'un autre qui est le phénomène de *diffusion*.

La *dissolution* est un phénomène de *changement d'état*. Le solide devient liquide. C'est une fusion, *fusion humide*, par opposition à la *fusion sèche*; une fusion qui se fait à température basse, tandis que la fusion sèche se fait à température élevée. Le salpêtre fond dans l'eau à 15° (dissolution, fusion humide) ; il fond à 330° (fusion sèche).

Le dissolvant a donc pour effet d'abaisser le point de fusion, de liquéfaction, du corps. Il produit le même effet que l'échauffement du corps. A mesure que la quantité de dissolvant diminue, il faut chauffer davantage pour amener la dissolution ; à la limite, il faut chauffer précisément jusqu'au point de fusion sèche.

L'expérience et la théorie établissent encore que l'augmentation de pression élève le point de fusion, que la diminution de pression l'abaisse — et, par conséquent, l'action du dissolvant, en abaissant le point de fusion, équivaut à une diminution de pression, à une diminution de la force qui rapproche les molécules du corps considéré (force de cohésion).

En résumé, l'action du dissolvant équivaut à l'échauffement du corps, ou à la diminution de la pression qu'il subit.

La *diffusion* répand la substance dissoute dans toute l'étendue du liquide jusqu'à ses extrêmes limites. C'est un mouvement de transport continu et progressif des particules du corps, mouvement qui est indépendant de l'acte de la dissolution, qui lui succède, et qui d'ailleurs est sans rapport de grandeur avec lui. Par exemple, le sucre de canne est très soluble et diffuse lentement ; le chlorure de sodium est moins soluble et diffuse très vite. *Si la dissolution est une fusion, la diffusion a les plus grands rapports avec une vaporisation.* Le corps subit une extension presque illimitée. Ses particules s'écartent de plus en plus, et, pour ainsi dire, sans terme.

Le trait distinctif de l'état solide et de l'état liquide, c'est la limitation du volume, la conservation du volume à température constante. L'état gazeux, au contraire, est caractérisé par l'illimitation du volume, lequel tend toujours à s'accroître et n'a d'autres bornes que celles du récipient. C'est là la condition de la substance qui diffuse. Son mouvement de diffusion est l'image de l'expansion d'un gaz (1).

On peut donc concevoir que la substance dissoute puisse être assimilée à un gaz. Il faut, pour cela, toutefois, que le dissolvant offre au corps dissous un espace assez vaste où se répandre. Cet espace doit être assez vaste pour que les molécules de ce corps dissous soient libérées de tout lien de cohésion entre elles.

C'est ce qui arrive pour les gaz. Un gaz est constitué de particules indépendantes, trop éloignées pour l'exercice de la cohésion. Les lois qui dérivent de la théorie des gaz supposent qu'aucun lien ne rattache leurs molécules entre elles. Si le refroidissement ou la compression rapprochent les molécules et établissent des sortes de liaisons entre elles, les propriétés caractéristiques des gaz se voilent et deviennent moins claires. Au voisinage du point de liquéfaction, les lois des gaz sont en défaut.

Il en est de même pour les solutions. Une solution concentrée est dans l'état d'un gaz comprimé, voisin de son point de liquéfaction. Les propriétés de l'état de dissolution s'y obscurcissent. D'une façon générale, la substance dissoute ne peut sortir d'aucun côté du dissolvant : elle y est enfermée. Plus elle y est abondante, plus elle est comprimée, moins les molécules y sont indépendantes : celles-ci, alors, sont dans un état intermédiaire à l'état liquéfié et à l'état gazéifié parfait. Il ne peut être question d'état solide ; le volume dépasse celui de l'état solide à cette température, et même de l'état liquide à la température de fusion : c'est bien une transition entre l'état liquide et l'état gazeux.

Au contraire, une solution étendue est dans la condition d'un gaz, d'une vapeur raréfiée, loin de son point de liquéfaction.

Ainsi, le dissolvant ne doit être considéré que comme un moyen de produire ou de permettre l'expansion du corps dissous : il faut l'envisager, non plus comme une *substance*, mais comme un *volume*, une *capacité*, un *espace* propre à l'extension de la matière soluble.

Lorsque celle-ci est parvenue aux limites du dissolvant, elle exerce contre les parois qui l'enferment, — et particulièrement contre la membrane osmotique, dans le cas qui nous occupe, — la même pression qu'un gaz ou une vapeur arrêtés dans leur expansibilité par les parois du vase qui les contient. Cette pression, c'est précisément la pression osmotique. A la surface libre, c'est l'air qui fait obstacle à l'expansion. De ce côté, la pression n'est autre

(1) Ce mouvement est lent, mais il n'importe. STEPHAN (*Acad. de Vienne*, 1879, II, p. 214) a calculé le temps qu'il faudrait, d'après les déterminations de Graham, à 1 milligramme de diverses substances (en solution à 10 p. 100) pour s'élever d'un mètre, en hauteur verticale, dans l'eau ou dans une gelée quelconque. Il faudrait 319 jours pour NaCl ; 2 ans et 7 mois pour le sucre $C^{12}H^{22}O^{11}$; il faudrait 14 ans à l'albumine.

chose que la tension de vapeur du corps dissous qui occupe le volume entier du dissolvant, et qui tend à en sortir.

D'après ces considérations, le corps dissous devient un gaz qui a pour pression sa pression osmotique; pour volume celui du dissolvant; pour masse la quantité de substance dissoute répandue dans cet espace, dans ce volume, laquelle est exprimée par la concentration.

Telle est l'hypothèse de l'assimilation des solutions aux corps gazeux. Van t'Hoff l'a ainsi formulée :

La pression osmotique d'une solution a la même valeur que la pression qu'exercerait la substance dissoute, si, à la température de l'expérience, elle était gazeuse et occupait un volume égal à celui de la solution.

72. Les solutions de concentration moyenne sont comparables aux vapeurs au voisinage de leur point de liquéfaction. — Avant de passer aux vérifications, il est possible d'analyser davantage.

On envisage, en physique, les gaz de deux manières différentes : selon la conception statique ou selon la conception cinétique.

La théorie cinétique présente un grand caractère de probabilité. Elle suppose les molécules des gaz animées de mouvements très étendus. Aucun lien ne les rattache entre elles. Elles n'exercent d'action mutuelle les unes sur les autres qu'aux courts instants où le hasard de leur course les amène à se heurter, — ou, pour mieux dire, à pénétrer dans le rayon d'action de quelque autre molécule, rayon qui est très court et négligeable par rapport à l'étendue de leurs trajectoires. Celles-ci sont en général des lignes droites; le mouvement est une translation. La pression du gaz sur les parois du vase qui le renferme est due à ces chocs (1).

Dans la conception statique, on n'envisage pas les mouvements des molécules. On les suppose immobiles dans des positions qui répondent aux centres ou positions moyennes des mouvements de tout à l'heure. D'après le principe d'Avogadro, quels que soient le gaz ou la vapeur considérés, *ces molécules sont à la même distance*; il y en a *le même nombre dans le même volume*; et lorsque l'on fait varier la température et la pression, les lois de Mariotte et de Gay-Lussac exigent que les distances s'accroissent ou diminuent, que les molécules s'écartent ou se rapprochent de la même valeur pour tous.

L'assimilation des corps dissous aux gaz offre donc deux manières aussi de concevoir la pression osmotique. C'est un effort contre les parois du vase ou contre la membrane de l'osmomètre, exercé par les molécules du corps dissous, qui tendent à se répandre dans l'eau, remplissant les deux biefs et la membrane elle-même; mais elles sont empêchées d'obéir à cette tendance

(1) On a essayé de donner une image, plus ou moins grossière, de ce phénomène en comparant les molécules du gaz aux abeilles remplissant une ruche et heurtant les parois dans leur vol désordonné. L'effet total de ces chocs est proportionnel à leur nombre; et si le nombre reste le même, les rencontres deviendront deux fois plus fréquentes lorsque le volume de la ruche deviendra deux fois moindre et l'effet deux fois plus grand. Les choses se passeront comme si le nombre d'abeilles avait doublé (Etard).

par la membrane hémiperméable qui les arrête à la façon d'un crible. — Avec la théorie cinétique, on précisera davantage et l'on regardera la pression osmotique comme engendrée par les chocs des molécules dissoutes frappant les parois et la membrane, comme si ces molécules étaient dans le vide et que le dissolvant ne comptât point. On reviendra, plus loin, sur cette interprétation.

73. *Vérification expérimentale. Confrontation de la pression osmotique calculée à la pression mesurée.* — Quelle que soit la conception de la constitution des gaz à laquelle on s'arrête, l'identification du corps dissous au corps gazeux entraîne les mêmes conséquences générales et donne lieu aux mêmes vérifications. La pression osmotique se calcule comme une pression gazeuse. *Les molécules d'un corps dissous, répandues dans un liquide, y développent exactement la même pression, en atmosphères, qu'elles développeraient si on les gazéifiait dans le même espace.*

Si l'on veut exprimer encore la même idée sous une autre forme, on dira : *La pression osmotique est la pression de la substance dissoute, supposée gazéifiée dans un volume égal à celui de la solution.*

Cette conséquence directe de l'hypothèse peut être soumise à une vérification expérimentale.

Appliquons, en effet, cette notion à calculer la pression osmotique, à la température de 14°, d'une solution de sucre de canne dissous dans l'eau à raison de 1 gramme pour 100 grammes d'eau $\left(\text{concentration } \frac{1}{100}\right)$. Nous confronterons cette valeur théorique aux valeurs expérimentales fournies par Pfeffer, qui a précédemment étudié cette même solution.

La formule $C^{12}H^{22}O^{11}$ assignée au saccharose indique que la molécule de ce corps pèse 342 gr. ($C^{12} = 144$; $H^{22} = 22$; $O^{11} = 176$), en supposant que celle de l'hydrogène H^2 pèse 2 grammes ou l'atome d'hydrogène H, 1 gramme. Les poids moléculaires 2, 342, représentent non le poids d'une molécule, comme on le dit cependant par abréviation, mais le poids d'un même nombre de molécules — et par conséquent représentent, aux mêmes température et pression, des volumes égaux de vapeur de sucre et de gaz hydrogène. Il n'est pas possible, à la vérité, de réduire le sucre en vapeur parce qu'il se détruit et se carbonise auparavant; mais si on le pouvait, la quantité de vapeur fournie par 342 grammes de sucre occuperait à la température et à la pression de vaporisation, et par suite aussi à 0° et à 760 millimètres de Hg, le même volume que 2 grammes d'hydrogène — c'est-à-dire 22 litres 3 (1).

Ceci posé, revenons à la solution de sucre à 1 p. 100. L'expérience apprend que si l'on ajoute 1 gramme de sucre à 100 grammes d'eau on obtient un volume de solution égal à $100^{cc},6$. [On a donné à ce nombre $100^{cc},6$ le nom de *volume spécifique* du corps dissous; c'est *le volume auquel est étendu 1 gramme de la matière dissoute* (Voy. n° 47, 4°)]. Prenons une solution de même concentration (1 p. 100), mais qui, au lieu de 1 gramme de sucre, en contiendrait 342 grammes. Si 1 gramme de sucre occupe $100^{cc},6$, 342 grammes de la même solution occuperont

$$100,6 \times 342^{cc} = 34^{l},405.$$

Nous connaissons donc maintenant deux conditions d'une même *masse de sucre* (342 gr.) occupant :

Dans le premier cas à 0° et pression normale, à l'état de vapeur, le volume.		$22^{l},3$
— deuxième cas à 14°, pression x	— —	$34^{l},405$

On est dans les conditions qu'il faut pour appliquer les lois de Mariotte et Gay-Lussac, c'est-à-dire la formule

$$\frac{pv}{1+\alpha t} = p^0 v^0.$$

On aura donc :

$$\frac{x . 34{,}405}{1+\frac{1}{273}\times 14} = 22^{l},3 \times 1 \text{ atm. } (760^{mm} \text{ Hg})$$

d'où, en atmosphère, $x = 0{,}681$.

Telle est la pression osmotique, calculée théoriquement, de la solution sucrée de concentration 1 p. 100, à 14°. On n'a fait qu'appliquer la supposition seule que le corps dissous se comporte comme un corps gazeux qui serait gazéifié dans le même espace que lui offre la solution et qui suivrait les lois des gaz.

(1) Le même raisonnement s'applique à un corps quelconque, et par conséquent $22^{l},3$ représente le *volume moléculaire* de tous les gaz et de toutes les vapeurs, à 0° et 760 millimètres, c'est-à-dire le volume (en litres) occupé par le nombre de grammes représenté par le poids moléculaire (*molécule-gramme*). La molécule des gaz simples est formée de deux atomes. Le volume atomique des gaz simples (H, Cl, O, etc.) est donc de $11^{l},15$. C'est le volume en litres du poids atomique évalué en grammes (atome-gramme).

Confrontons ce résultat théorique à la valeur expérimentale fournie par l'expérience de Pfeffer. La pression osmotique *mesurée* à 14° pour la solution de saccharose à 1 p. 100 est 0,671 : la pression *calculée* est 0,681. — L'accord des deux nombres est satisfaisant.

Cette comparaison a été faite sur plusieurs solutions sucrées, dans des conditions différentes : l'accord s'est soutenu de même. Le tableau suivant en fait foi.

Températures t	Pressions osmotiques de la solution de sucre à 1 p. 100 mesurées.	Pressions osmotiques calculées d'après l'hypothèse de l'identification du corps dissous à un gaz.
6,8	0,664 atmosph.	0,665
13,7	0,691 —	0,681
14,2	0,671 —	0,682
15,5	0,684 —	0,686
22	0,721 —	0,701
33	0,716 —	0,725
36	0,746 —	0,733

Seconde série d'expériences, à température constante, avec des concentrations différentes :

Concentration.	Pressions osmotiques mesurées.	Pressions calculées.
1 p. 100	0,664 atmosph.	0,665
2 —	1,336 —	1,336
2,25 —	1,997 —	1,639
4 —	2,739 —	2,742
6 —	4,046 —	4,050

74. Vérification de la loi des températures par les déterminations de Pfeffer, de Vries, Donders et Hamburger. Expériences de Soret. — La vérification de la loi des températures résulte non seulement des expériences directes de Pfeffer, mais de celles de De Vries, de Donders et Hamburger et de Soret.

De Vries a constaté, en se servant de cellules végétales comme indicateurs, que les solutions isotoniques à une température restaient isotoniques aux autres températures.

Donders et Hamburger ont fait les mêmes observations en prenant pour indicateurs des cellules animales, les globules rouges du sang. Ils ont vu que des solutions de sucre, de chlorure de sodium, d'azotate de potasse, isotoniques à 0°, sont encore isotoniques à 34°.

Soret a démontré d'une autre manière la proportionnalité des pressions osmotiques aux températures absolues. Son expérience consiste à disposer une solution étendue dans une éprouvette ayant une assez grande hauteur; on chauffe à une température constante, au moyen d'un manchon annulaire rempli d'eau bouillante, une tranche supérieure de cette colonne. Après un certain temps, un régime normal s'établit. La colonne se trouve divisée en une série de tranches dont la température décroît régulièrement, par exemple de 80° à 15°. Une série de thermomètres permet d'apprécier cette succession de températures. Un dispositif convenable permet de prélever du liquide de manière à connaître la concentration d'une couche donnée, dont un thermomètre fournit d'ailleurs la température. On constate ainsi que le produit du volume par la concentration est constant.

Ainsi une tranche supérieure d'une solution de sulfate de cuivre à température de 80° a une concentration de 14,03 p. 100; le produit de la température absolue (273° + 80° = 353) par la concentration (14,03) est 4952,59; — d'autre part, une tranche inférieure, à température centigrade 20° (absolue 273 + 20 = 293°) a une concentration 17,33 p. 100; le produit est 5077,69. L'accord est satisfaisant.

Dans une autre expérience, la couche à 80° a une concentration de 23,8 p. 100; le produit est 8401,4; la couche à 20° a une concentration de 29,8 p. 100; le produit est 8731,4. L'accord est encore satisfaisant, étant donné l'ordre de la précision expérimentale.

Or, cette proportionnalité entre la concentration et la température absolue vérifie la loi des températures, et en général les lois des solutions.

En effet, le maintien de l'équilibre dans les différentes tranches de la colonne suppose que la pression osmotique y est la même partout; que toutes les tranches sont isotoniques. D'autre part, les lois des solutions peuvent se résumer, comme on le verra (n° **78**), dans la formule

$$\pi = \frac{R}{M} TC \qquad \text{(IV)}$$

où la concentration C est mise en évidence.

π, représente la pression évaluée en grammes par centimètre carré de surface;
M, le poids moléculaire de la substance dissoute;
R, la constante des solutions, qui est celle des gaz, 84500;
T, la température absolue;
C, la concentration de la solution en volume, c'est-à-dire le nombre de grammes existant dans 100 centimètres cubes de solution.

La pression étant la même dans toutes les couches, le produit TC doit être constant; inversement, si TC est constant, l'on peut écrire la formule (IV) qui résume les lois de l'osmose.

75. ***Forme définitive des lois de l'osmose.*** — Ces vérifications et

d'autres du même genre légitiment donc l'hypothèse de Van t'Hoft. Nous avions présenté d'abord l'accord des lois de l'osmose avec les lois des gaz comme une sorte de pure coïncidence permettant de formuler les résultats expérimentaux. C'est tout autre chose. L'accord n'a rien de fortuit. Nous voyons qu'il a des causes plus profondes, et c'est l'honneur de Van t'Hoff de les avoir dévoilées.

En résumé, les lois osmotiques s'énoncent ainsi (1).

1° Loi de Mariotte. — *Pour une même masse de molécules dissoutes, la pression osmotique est en raison inverse du volume de solution dans lequel cette masse est étendue, c'est-à-dire proportionnelle à la concentration.*

On a

$$\pi V = \text{constante}.$$

π étant la pression osmotique ; V le volume de la solution quelconque que l'on considère, volume occupé par la masse du corps qui est dissous. Nous pouvons choisir pour masse constante le poids moléculaire en grammes M. Alors V sera le volume de solution qu'il faudrait prendre pour que ce volume contînt le poids M, en conservant sa concentration.

2° Loi de Gay-Lussac. — *Pour une même masse de molécules dissoutes, la pression osmotique croît proportionnellement au binôme de dilatation* $1 + \alpha t$, *ou à la température absolue* T.

α est le coefficient de dilatation des gaz $\alpha = \frac{1}{273}$; et $1 + \alpha t = \alpha\left(t + \frac{1}{\alpha}\right)$ $= \frac{1}{273}(t + 273)$.

La température absolue, c'est la température comptée de 273° au-dessous de zéro ; à cette t. on ne bande plus.

$$T = t + 273,$$

On a donc

$$\frac{\pi V}{T} = \text{constante}.$$

3° Loi d'Avogadro. — *La pression osmotique est la même, quelle que soit la matière dissoute, quand le nombre des molécules dissoutes dans un même espace est le même.*

Chaque molécule dissoute exerce, en solution, la même pression osmotique, quelle que soit sa substance.

Enfin, Van t'Hoff a montré que la pression osmotique était indépendante de la nature du dissolvant, comme elle l'est de la matière dissoute.

4° Loi de Van t'Hoff. — *La pression osmotique est indépendante de la nature du dissolvant comme de la nature de la substance dissoute.*

76. Formule des solutions ; constante des solutions, en comparaison avec la formule des gaz et la constante des gaz. — La

(1) A. Hollard, *Revue des sciences*, 15 mai 1898. — Étard, *Les nouvelles théories chimiques*, p. 105.

formule qui résume ces lois, pour les solutions comme pour les gaz, est

$$\frac{\pi v}{1+\alpha t} = \frac{\pi' v'}{1+\alpha t'} = \pi_0 v_0 = \text{constante},$$

ou, comme nous venons de le voir, en introduisant la température absolue $T = 273^\circ + t$:

$$\frac{\pi V}{T} = \text{R constante.} \qquad \text{(I)}$$

π pression osmotique, évaluée, par exemple, en grammes par centimètre carré de surface.

V volume en centimètres cubes, qui serait occupé, dans la solution que l'on envisage, par le poids moléculaire, M, du corps dissous, c'est-à-dire par le nombre de grammes que représente ce poids moléculaire. Ce volume V peut encore être exprimé au moyen de la concentration et du poids moléculaire. Si C est la concentration de la solution, c'est-à-dire si elle contient C grammes dans 100 centimètres cubes, elle contiendra 1 gramme dans $\frac{100}{C}$ centimètres cubes, et M grammes dans $\frac{100\,M}{C}$. Le volume V sera $\frac{100\,M}{C}$ centimètres cubes.

R est une constante.

Cas des gaz. — Pour les gaz, cette constante est $R = 845$.

En effet, prenons une certaine masse d'un gaz parfait, l'oxygène par exemple, masse qui correspond au poids moléculaire $O^2 = 32$. — Ce poids, 32 grammes, occupe à 0° et 760^{mm} un volume 22^{lit},33 ou 22 330 centimètres cubes.

On a

$$\frac{pV}{T} = R = \frac{p_0 V_0}{T_0}.$$

V_0 est, en centimètres cubes, le *volume moléculaire*, le même pour tous les gaz = 22 330 centimètres cubes à 0°.

p_0 est, en grammes, la pression atmosphérique supportée par l'unité de surface, le centimètre carré ; c'est le poids d'une colonne de mercure ayant pour base 1 centimètre carré, pour hauteur 760 millimètres ; à savoir :

p_0 grammes = 1 centimètre cube $\times$ 76 cent. $\times$ 13,6 = 1 033^{gr},6.

T_0 est la température absolue répondant à 0° : c'est 273° ; 13,6 est la densité du mercure.

Il n'y a plus qu'à effectuer les calculs :

$$R = \frac{22\,330 \times 1033{,}6}{273} = 84\,500,$$

La formule des gaz parfaits est alors

$$\frac{pV}{T} = 84\,500\ldots$$

p étant évalué en grammes, V en centimètres cubes.

Cas des solutions. — *Formule de la pression osmotique.* — Pour les solutions, on peut faire le même calcul. On déduira R de la formule

$$\frac{\pi V}{T} = R \qquad \text{(I)}$$

en utilisant les nombres fournis par l'expérience pour π et pour V.

π est, évaulée en grammes, la pression par centimètre carré de surface;

V est évalué en centimètres cubes, de la manière suivante :

La formule (I) relie les pressions osmotiques et les volumes correspondants d'une même masse de la matière dissoute, envisagée comme réduite en vapeur, c'est-à-dire comme ayant les propriétés des vapeurs et des gaz. On prend pour cette masse constante, dont la formule (I) relie les variations de volume et de pression, précisément celle qui correspond au poids moléculaire évalué en grammes. Alors V représente en centimètres cubes le volume qui serait occupé dans la solution considérée par la molécule-gramme du corps dissous, ou, plus clairement, le volume de la solution qui contiendrait un nombre de grammes représentés par le poids moléculaire. On dit, d'une façon abrégée, que V représente, en centimètres cubes, la *molécule-gramme du corps dissous amené à la concentration de la solution.*

Les éléments du calcul étant précisés, on peut passer à l'application.

On calculera la constante en partant (n° **73**) de la solution de sucre de canne à 1 p. 100, à la température de 14°.

Le poids moléculaire du sucre est M = 342.

Le volume V de la solution à 1 p. 100 (concentration en poids) qui contiendrait 342 grammes est $34^{lit},405$ ou 34 405 centimètres cubes. On obtient ce chiffre en se rappelant que 1 gramme de sucre dans 100 grammes d'eau donne un volume de solution égal à $100^{cc},6$. Si la concentration était définie en volume, au lieu de l'être en poids, la solution à 1 p. 100 contiendrait 1 gramme dans 100 centimètres cubes de solution, et par conséquent, le volume V qui contiendrait 342 grammes serait $34^{lit},2$ ou 34 200 centimètres cubes.

La pression π se calcule théoriquement en supposant, avec Van t'Hoff, que le sucre dissous se comporte comme une vapeur ou un gaz et en suit les lois.

Sachant que le poids moléculaire de tous les gaz, de tous les corps gazéifiés, occupe un volume de $22^{lit},3$ à 0° et 760 — les 342 grammes de sucre dissous, gazéifiés, occuperaient aussi $22^{lit},3$ à 0° et 760 — et par conséquent, à 14° et sous le volume $34^{lit},405$ auraient une pression que l'on obtient immédiatement en appliquant la loi de Mariotte. On trouve (Voy. n° **73**) 0,681 en atmosphères. Il faut l'estimer en grammes sur un centimètre carré. Or, puisque 1 atmosphère exerce une pression de 1033,6 grammes sur un centimètre carré, les 0,681 exercent la pression $0,681 \times 1033,6 = 7038,8$ en grammes.

Cette pression $\pi = 703,88$ est la pression osmotique ; c'est la pression de la substance dissoute supposée gazéifiée dans un volume égale à celui de la solution.

La température T est égale à $273° + 14° = 287$.

En introduisant ces valeurs, $T = 287$; $V = 34,405$; $\pi = 703,88$; dans la formule $\pi \frac{V}{T} = R$, on trouve pour R la valeur 84 382, valeur très proche de 84 500.

En résumé, on trouve pour R, la constante des solutions, un nombre très voisin de 84 500. La constante des solutions est donc la même que la constante des gaz. Et c'est une nouvelle manière de faire la vérification de l'hypothèse de Van t'Hoff assimilant l'état dissous à l'état gazeux.

La formule de l'osmose devient alors :

$$\pi = 84500\,\frac{T}{V}. \tag{II}$$

Elle fournit immédiatement, en grandeur absolue, et dans les unités indiquées, la valeur de la pression osmotique d'une solution donnée.

77. *Autres expressions de la formule qui donne la pression osmotique.* — On introduit souvent dans les calculs, le *volume spécifique du corps dissous*, soit U.

Nous avons dit que l'on entendait par là le *volume de la solution qui contient 1 gramme de matière dissoute.* Par exemple, tout à l'heure (n° **73**), le volume spécifique de la solution de sucre était $100^{cc},6$; c'est-à-dire que $100^{cc},6$ de la solution de sucre considérée contenaient 1 gramme de sucre. Le volume V de la formule (II) qui représente le volume de la solution contenant, non pas un gramme, mais M grammes (M étant le poids moléculaire), sera MU. La formule $\pi = \frac{RT}{V}$ devient $\pi = \frac{RT}{MU}$ (α).

Si nous remarquons encore, comme une coïncidence de chiffres, que la constante $C = 84500$ est sensiblement le double de l'équivalent mécanique de la calorie-gramme $E = 42500$, nous pourrons remplacer dans la formule (II) V par MU et 84500 par 2E ; il viendra :

$$\pi = 2E\,\frac{T}{M},\,\frac{1}{U}. \tag{III}$$

C'est une autre forme sous laquelle on peut avoir à employer la formule des solutions.

78. *Formules exprimant la pression osmotique en fonction de la concentration en volume C — en poids C′ et C″.* — Formule. — On peut encore donner une autre expression à la pression osmotique en faisant intervenir la concentration. Nous avons dit (n° **47**) qu'il y avait plusieurs manières d'estimer la concentration. De là, plusieurs formules.

1° *Concentration en volume.* — La *concentration en volume* est exprimée par le nombre de grammes du corps dissous qui existe dans un volume donné de la solution (à température donnée). Par exemple, s'il y a n grammes du corps dans 100 centimètres cubes de solution, on dira que la concentration est $C = \frac{n}{100}$.

Ceci posé, revenons à la formule :

$$\pi = R\,\frac{T}{V}.$$

V représente le volume de solution contenant M grammes de corps dissous (M étant le poids moléculaire).

D'autre part, d'après la définition de la concentration, il y a n grammes du corps dans 100 centimètres cubes de solution : il y en aura 1 gramme dans $\frac{100}{n}$ centimètres cubes; et, enfin, il y en aura M grammes dans $M\frac{100}{n}$ centimètres cubes. C'est là V.

On aura donc :

$$\pi = RT\frac{1}{\frac{M.100}{n}} = \frac{RT}{M}\left(\frac{n}{100}\right)$$

ou

$$\pi = \frac{R}{M}TC. \qquad \text{(IV)}$$

C, concentration, étant le nombre de grammes du corps dissous existant dans 100 centimètres cubes de solution à la température fixée T.
M, poids moléculaire du corps dissous, en grammes.
R = constante des solutions = 84500.
T, température absolue.

2° *Concentration en poids.* — L'évaluation de la concentration en volume a l'avantage de simplifier les formules. Mais ce n'est pas ainsi, d'ordinaire, que les chimistes expriment la composition des corps complexes, mélanges ou combinaisons : c'est au moyen des poids.

La composition de la solution pourra s'exprimer ainsi :

$$\left\{\begin{array}{lll} 100 \text{ grammes} & \text{de dissolvant (100 d'eau)} \\ n \quad — & \text{du corps dissous} \quad — \end{array}\right\} = 100 + n \text{ gr. de solution.}$$

La concentration sera :

$$C' = \frac{n}{100}.$$

Soit *U' le volume spécifique du dissolvant.* C'est dire qu'il y a 1 gramme du dissolvant dans U' centimètres cubes de la solution. Il y aura 100 grammes du dissolvant dans 100 U'. Dans le même volume 100 U' de solution contenant 100 grammes de solvant, il y aura n grammes de corps dissous. Il y aura 1 gramme dans le volume de solution n fois moindre, $\frac{100\,U'}{n}$. Mais, par définition, le volume de solution contenant 1 gramme du corps dissous, *c'est le volume spécifique du corps dissous U.* Donc, $U = \frac{100\,U'}{n}$

ou

$$\frac{U'}{U} = \frac{n}{100} (= C'). \qquad \text{(V)}$$

Donc, la *concentration est égale au rapport des volumes spécifiques du dissolvant et du corps dissous.* C'est ce qu'exprime la formule (V).

La formule $\pi = \frac{RT}{MU}$ [(α) n° **77**] devient

$$\pi = R\frac{T}{M}\cdot\frac{1}{U'}\cdot\left(\frac{n}{100}\right)$$

ou

$$\pi = R.\frac{T}{M}\cdot\frac{1}{U'}C'... \qquad \text{(VI)}$$

3° *Autre manière d'exprimer la concentration en poids.* — La concen-

tration en poids peut encore s'exprimer par le nombre de grammes n du corps dissous, existant dans 100 grammes de solution.

$$100 \text{ grammes de solution : } \begin{cases} n \text{ grammes de matière dissoute.} \\ 100 - n \text{ grammes de dissolvant.} \end{cases}$$

$$\text{Concentration : } C'' = \frac{n}{100}.$$

Comme tout à l'heure, il y a $(100 - n)$ grammes de dissolvant dans $(100 - n)$ U' — et dans le même volume, il y aura n grammes de matière dissoute — et 1 gramme de matière dissoute dans $\frac{(100 - n)}{n}$ U'. C'est précisément U, par définition.

Donc

$$U = \frac{100 - n}{n} U'$$

d'où

$$\frac{U + U'}{U'} = \frac{100}{n} = \frac{1}{C''}$$

et

$$U = U'(C'' - 1)$$

d'où

$$\pi = R \frac{T}{M} \cdot \frac{1}{U'} \cdot \frac{C''}{1 - C''}. \qquad \text{(VII)}$$

79. *Démonstration théorique. — Indication générale de la marche suivie par Van t'Hoff.* — On peut faire diverses hypothèses relativement à la nature du phénomène de dissolution. Avec l'idée que s'en est formé Van t'Hoff, et en appliquant les principes de la therrmodynamique, on peut démontrer que la pression osmotique suit les lois des gaz et que la solution idéale a la même formule que les gaz parfaits.

1° *Hypothèse de Van t'Hoff.* — Pour Van t'Hoff, *le corps dissous est réellement à l'état gazeux.* La molécule dissoute ne subit pas de changement de nature, de changement chimique ; elle est à la molécule du corps avant dissolution ce qu'est la molécule de vapeur d'eau à la molécule d'eau, ce qu'est la molécule de gaz à celle du même gaz liquéfié, dissous ou solidifié. La dissolution idéale est une sorte de vaporisation. Le dissolvant n'offre qu'un espace où les molécules du corps dissous peuvent s'étendre. Par définition même, la théorie de Van t'Hoff ne va donc s'appliquer qu'aux solutions idéales remplissant deux conditions : α. D'être suffisamment étendues pour que les molécules du corps dissous (ou, du moins, leurs positions moyennes) soient éloignées à des distances qui excluent les actions mutuelles de ces molécules ; β. D'avoir une composition invariable. Cette invariabilité n'est certaine que pour les solutions organiques non électrolytes.

Les autres théories, relatives aux solutions, admettent des changements chimiques ; par exemple :

2° La combinaison du corps dissous avec le dissolvant. Ainsi, l'eau formerait avec le corps une série d'hydrates, variables avec la température et la concentration.

Au lieu d'*une solution pure* du corps, on aurait donc affaire à des solutions mixtes du corps et de divers hydrates. C'est la manière de voir de Berthelot et Mendeléef.

3° La dissociation du corps dissous. Elle peut se concevoir de deux manières :

Le corps dissous se dissocierait en combinaisons plus simples, par exemple les sels doubles en sels simples (Rudorff).

Le corps dissous se dissocierait en ses éléments électrolytiques, en *ions*. C'est la théorie de Svante Arrhénius, qui elle-même se présente avec diverses modifications (Reychler, etc.).

Revenons à la théorie de Van t'Hoff.

a. — Le premier point consiste à établir que *le phénomène qui engendre la pression, osmotique peut donner lieu à des transformations réversibles* (fig. 441).

Imaginons une solution de sucre A, au-dessus de laquelle sera disposée avec précaution une couche d'eau pure B. Ce système ne reste pas en équilibre. Il se produit une diffusion qui entraînera les molécules de sucre de la partie inférieure vers la partie supérieure, et en général du lieu de plus grande concentration au lieu de concentration moindre. Ce mouvement ne s'arrêtera que lorsque le sucre sera réparti également dans l'ensemble du système.

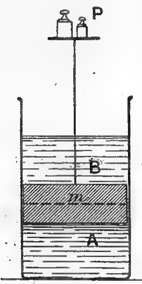


Fig. 441.

Imaginons maintenant qu'entre les deux couches de liquide on ait, au début, disposé une membrane semiperméable, *m*, formant piston à frottement doux. L'eau peut la traverser : le sucre ne le peut pas. Cet artifice permet de réaliser le mélange de sucre et d'eau d'une manière *isotherme et réversible*. Si l'on abaisse le piston, le sucre sera comprimé, sa concentration augmentera avec la pression ; l'eau passera du bief inférieur dans le bief supérieur. — Inversement, si l'on relève le piston, l'eau passe en sens inverse et la solution de sucre s'étend.

Les molécules de sucre tendent à se diffuser dans l'eau ; et cette tendance, qui se manifeste lorsque le piston n'existe pas, n'en subsiste pas moins lorsqu'il existe. Le piston subit une poussée, une pression de bas en haut. L'effet en sera de soulever ce piston, et de permettre à une nouvelle quantité d'eau de passer à travers la membrane hémiperméable, du bief supérieur dans le bief inférieur, quantité d'eau qui viendra diluer le sucre. Il y aura donc mouvement du piston, à moins qu'on n'y fasse obstacle en plaçant des poids sur le petit plateau qui termine la tige du piston. L'équilibre sera alors établi entre ces poids d'une part et la pression d'expansion qui est la *pression osmotique*. Ceci revient à dire que la pression osmotique est la force même de diffusion.

Si l'on diminue, maintenant, les poids du plateau, la pression osmotique soulèvera le piston de nouveau. Mais à mesure qu'elle accomplit ce travail, de l'eau pénètre dans le bief inférieur et cette dilution fait baisser la valeur

de la pression osmotique d'expansion. On arrive ainsi, bientôt, à un nouvel équilibre. Le travail exécuté a pour mesure la valeur moyenne de la pression osmotique dans l'intervalle de la première position à la seconde, multipliée par le déplacement, lequel est donné lui-même par la hauteur de la colonne d'eau qui aura pénétré dans le bief inférieur et dilué la solution primitive.

L'analogie avec la pression gazeuse est évidente. Supposons que le compartiment A contienne un gaz, au lieu de sucre. En B, le vide. L'expansion, la force de diffusion du gaz constituera la pression gazeuse. Si l'on augmente la pression extérieure, on comprimera le gaz ; si on la diminue, le piston remontera.

Quand l'équilibre est établi entre la pression extérieure exercée sur le piston d'une part et la pression osmotique (ou la pression gazeuse), d'autre part, la plus petite variation qui se produira dans l'une ou l'autre de ces pressions suffira pour renverser le sens du phénomène.

b. — On peut démontrer, au moyen des principes de la thermodynamique, la loi des températures, c'est-à-dire la proportionnalité entre la pression osmotique et la température absolue, lorsque la concentration est maintenue constante.

Partant d'une position du piston, dans le cylindre représenté plus haut, on peut opérer une première transformation isothermique. Elle consiste à augmenter le volume en élevant le piston et cela de manière que l'apport de chaleur du dehors maintienne la température constante et serve tout entier à exécuter le travail extérieur de soulèvement du piston. Aucune partie n'est distraite pour l'exécution d'un travail interne, puisque l'on suppose une solution assez étendue, à molécules assez éloignées, pour que celles-ci n'exercent point d'action réciproque.

Seconde transformation ; cette fois adiabatique. Le cylindre est supposé entouré de telle manière qu'il ne puisse ni céder ni emprunter de la chaleur. On augmente le volume en soulevant encore le piston. La température baisse.

On revient à l'état initial au moyen d'une troisième et d'une quatrième transformation. La troisième est une transformation isothermique : elle consiste à exercer sur le piston une pression qui diminuera le volume de la solution, exactement d'autant que la première transformation isothermique l'avait augmentée, et à absorber la chaleur dégagée. La dernière transformation, adiabatique, consistera à diminuer encore le volume exactement comme la première transformation adiabatique l'avait augmenté, mais en laissant la température s'élever. On aura ainsi accompli le cycle et on sera revenu au point de départ.

En appliquant à ce *cycle* de transformations le principe de Carnot, on obtient une relation entre la variation de pression osmotique et la variation de température à volume constant. Et, finalement, après intégration, on obtient une relation entre la pression osmotique et la température absolue, qui est de la forme

$$\frac{P}{T} = \text{constante.}$$

La concentration restant la même, la pression osmotique est proportionnelle à la température.

c. — La théorie permet, de même, d'aborder le problème de l'identification de la pression osmotique à la pression gazeuse.

Prenons un corps que l'on puisse considérer comme donnant lieu à la fois à une pression osmotique et à une pression gazeuse. Un corps gazeux à la température ordinaire, tel l'oxygène, pourra réaliser cette condition : il suffit d'imaginer l'existence d'une membrane hémiperméable qui laisserait passer l'eau et arrêterait ce gaz, et inversement une autre membrane qui laisserait passer le gaz et arrêterait l'eau. En imprimant des transformations constituant un cycle réversible à l'un et l'autre système, et en écrivant la condition d'équilibre fournie par le principe de Carnot, on trouve qu'à égalité de concentration et de température la pression gazeuse et la pression osmotique se confondent (1).

80. Examen de la théorie de Van t'Hoff. Difficultés. Elle ne donne pas une image de la pression osmotique. — La théorie de Van t'Hoff offre quelques difficultés. La première que nous signalerons consiste dans l'espèce de contradiction qu'il semble y avoir entre la nature et la direction de la pression osmotique et la direction des mouvements qu'elle produit.

Considérons en effet l'osmomètre V, dont la paroi est formée d'une membrane hémiperméable consolidée, comme est l'osmomètre de Pfeffer. Le corps dissous (sucre) est à l'intérieur. Les molécules de sucre, assimilées à des molécules des gaz, selon la conception de Van t'Hoff, exercent la pression osmotique, à la façon d'un gaz contenu dans le récipient, de dedans en dehors.

D'autre part, le mouvement que l'on observe est, au contraire, celui de l'eau, qui pénètre de dehors en dedans. Le mouvement réel s'exerce dans un sens inverse de la direction de la force que l'on considère. Celle-ci est appliquée aux molécules du corps dissous, et de dedans vers le dehors ; ce que l'on voit, c'est le mouvement des molécules du dissolvant de dehors en dedans. Ainsi la force n'est pas appliquée au corps réellement mobile (l'eau) ; le mouvement n'a pas lieu dans le sens de la force, mais en sens contraire.

Fig. 442.

Telle est la difficulté.

Il y a, à la vérité, deux manières de résoudre ce paradoxe.

I. — La nature, on le sait, ne nous offre d'exemples que d'actions mutuelles. En fait, nous ne voyons jamais qu'un corps A en attire un autre B : ce que nous voyons, c'est que A et B s'attirent ; qu'il y a, entre eux, une attraction réciproque. Toute force naturelle est un ressort tendu entre les

(1) P. Schutzenberger et O. Boudouard, *Leçons de Chimie générale*, p. 270-277. Paris, 1898.

corps agissants. Si A est mobile et B fixe, c'est A qui marche vers B ; si c'est B qui est mobile, c'est lui qui se déplace ; s'ils sont mobiles l'un et l'autre, ils se déplacent tous les deux.

Tel est l'enseignement de l'expérience. On lui a donné en mécanique une expression obscure et souvent incomprise. On fait, de cette vérité, le *principe d'égalité d'action et de réaction*. Et l'on dit que quand une action existe, il existe aussi une réaction qui lui est contraire.

On devra donc dire, ici, que la pression osmotique, la force d'expansion qui porte les molécules de sucre vers les molécules d'eau, est une force double, s'exerçant comme un ressort tendu, entre les molécules du sucre que la membrane hémiperméable empêche de se déplacer, et les molécules d'eau. Ce sont donc celles-ci qui se mettent en mouvement et se rapprochent des autres.

Nous voici revenus, par conséquent, aux explications de la force osmotique données par Dutrochet, Pfeffer et les prédécesseurs de Van t'Hoff. Mais ce savant, en assimilant le corps dissous à un gaz et le dissolvant à un espace immatériel, exclut évidemment cette explication des forces doubles naturelles et du principe d'égalité d'action et de réaction. La pression d'un gaz n'est pas une force qui s'exerce entre ce gaz et un corps extérieur tel que l'eau, mais seulement entre les particules de ce gaz.

L'antinomie subsiste donc absolument. La pression gazeuse exercée par les molécules dissoutes est une explication inintelligible du mouvement osmotique. Ce qu'il y a de remarquable, c'est que la plupart des auteurs, ne s'apercevant pas de cette contradiction fondamentale, font, dans l'explication du mécanisme de l'osmose, une sorte de mélange ou de pot-pourri de la théorie de Van t'Hoff avec celles, toutes différentes, qui supposent une attraction entre le corps dissous et le solvant.

Il n'en reste pas moins que si la théorie de Van t'Hoff ne nous rend pas compte du sens de la pression osmotique, elle nous en donne la valeur et les variations avec une extrême précision.

II. — Il y a, avons-nous dit, une seconde manière — et sans doute meilleure, d'écarter la difficulté. — C'est de pousser au bout la comparaison du corps dissous avec le gaz, et de montrer que les choses se passent de même de part et d'autre.

Le corps dissous est l'analogue d'un gaz ; — le dissolvant n'est qu'un espace où le corps dissous peut s'étendre ; il est l'analogue de l'éther dans lequel les molécules du gaz peuvent se répandre. L'osmomètre (Voy. fig. 441) peut être assimilé à un récipient cylindrique complété supérieurement par un piston mobile ; au-dessous, dans le récipient, le gaz ; au-dessus du piston, extérieurement, le vide, c'est-à-dire l'éther. Le piston est poussé par le gaz qui ne peut le traverser, il se déplace : il est, au contraire, perméable à l'éther, qui entre dans le récipient et dilue le gaz. Ainsi, la pression est exercée par les particules gazeuses de dedans en dehors, et ce qui semble mis en mouvement, c'est l'éther qui pénètre de dehors en dedans. On n'est pas frappé de cette difficulté à propos des gaz ; pourquoi le serait-on à propos des solutions ?

Il faut pourtant reconnaître que si l'on ne se pose pas la question à propos de la pression gazeuse, c'est que le mouvement réel est celui du piston, que la poussée gazeuse s'y applique réellement, que le mouvement a lieu dans le sens de la force, et qu'au contraire le mouvement de pénétration de l'éther n'est pas réel et absolu, mais seulement relatif.

En somme, l'objection subsiste.

III. — Van t'Hoff a tourné la difficulté d'une autre manière, et trouvé un biais pour faire intervenir l'action réciproque de l'eau et du corps dissous, ou, mieux, pour s'en passer.

Considérons l'eau pure, liquide, dans un vase. Les forces qui s'exercent sur elle sont : la pression extérieure atmosphérique d'une part, et d'autre part une pression d'une nature particulière qui s'exerce à la surface libre, et nommée *tension superficielle* du liquide. Ce n'est pas le moment d'examiner la nature de cette force ; nous renvoyons au chapitre relatif à cette question. Toujours est-il que les molécules de l'eau pure en équilibre balancent les deux forces que nous venons d'indiquer. C'est ce qui se passe dans le vase extérieur de l'osmomètre.

Dans la solution du vase intérieur, il en est autrement. L'eau n'occupe qu'une partie du volume total, ses molécules sont écartées par celles du corps dissous. La tension moléculaire de l'eau n'est pas la même que tout à l'heure. Elle est plus petite, comme la tension d'un gaz dilué dans un mélange.

Pour qu'il y ait équilibre, d'un côté à l'autre de la membrane (perméable à l'eau), il faut que la tension moléculaire de l'eau soit la même de part et d'autre. C'est ce qui arriverait pour un gaz pur mis en présence du même gaz mélangé à un autre : il faudrait, pour l'équilibre, que la tension partielle de ce gaz dans le mélange fût égale à la pression totale du gaz pur extérieur.

Il y aura donc pénétration du dissolvant, de l'eau, jusqu'à ce que sa tension partielle dans la solution soit égale à la tension totale de l'eau pure dans le vase extérieur.

En somme, au moment où l'équilibre sera établi, la tension totale à l'intérieur de l'osmomètre se trouvera augmentée, par rapport à celle du vase extérieur, de la tension moléculaire du corps dissous. Cette différence représente précisément, d'après l'expérience même, la pression osmotique. La pression osmotique est donc égale à la tension moléculaire du corps dissous ; mais le mouvement provoqué est, maintenant, celui de l'eau pénétrant dans l'osmomètre.

81. *Critique du principe de Van t'Hoff. Mécanisme de la pression osmotique.* — Quelques auteurs, Reychler (1) entre autres, s'attaquent au principe même de la théorie de Van t'Hoff. Le savant hollandais, disent-ils, confond l'état liquide de la solution avec l'état gazeux : il néglige les attractions moléculaires qui font la cohésion des liquides et des solides, et dont la suppression donne à l'état gazeux sa relative simplicité : il

(1) A. Reychler, *Les théories physico-chimiques*, 1897, p. 227. Carré et Naud, Paris.

supprime, dans le phénomène de dissolution, toute intimité de rapports entre le dissous et le dissolvant.

Voyons si cette supposition est acceptable, même dans le cas le plus favorable, celui des gaz. Il y a sans doute des gaz pour lesquels elle peut être admise, en réalité, et dont on peut soutenir qu'ils ne font guère que se diffuser dans le dissolvant en maintenant leur état gazeux. Mais il y en a un plus grand nombre qui contractent avec le dissolvant une union plus intime. Par exemple, SO^2, CO^2, H^2S, AzH^3, dégagent de la chaleur en se dissolvant dans l'eau ; ils en dégagent même plus qu'en se liquéfiant simplement. Leurs molécules ne sont donc pas en état d'indépendance complète. Toutefois, ils suivent encore les lois de l'osmose et de l'abaissement du point de congélation, et ne conduisent pas le courant électrique, ce qui indique que leurs molécules gardent leur caractère individuel et leur nombre et qu'elles ne forment pas avec l'eau des sortes de sels dissociables.

Enfin, il y a des gaz, les hydracides gazeux tels que HCl, HBr, qui dégagent une grande quantité de chaleur en se dissolvant, qui forment avec l'eau des solutions stables, pouvant être même distillées sans décomposition, mais que leurs caractères cryoscopique et électro-chimique démontrent être dissociés en systèmes salins.

En résumé, même pour les gaz qui se dissolvent, on est obligé d'admettre, dans beaucoup de cas, une condensation, une action moléculaire réciproque et même une action sur le dissolvant.

Si des corps, déjà gazeux, se comportent ainsi et perdent dans la dissolution la liberté gazeuse, il est difficile d'admettre que des corps solides et liquides l'acquièrent dans la même opération.

Reychler considère comme plus rationnel d'attribuer aux corps dissous les propriétés de l'état liquide. La dissolution résulte de l'attraction prépondérante des molécules hétérogènes, les molécules du corps dissous étant plus énergiquement attirées par l'eau que par leurs similaires. En partant de cette donnée et en l'utilisant convenablement, on peut arriver à démontrer que les choses se passent comme si les molécules dissoutes tendaient à s'écarter l'une de l'autre aussi loin que si elles étaient gazeuses. Le jeu des attractions ou répulsions moléculaires tendra vers le même effet final, que la matière soit dissoute ou vaporisée. L'attraction prépondérante des molécules dissoutes pour les molécules dissolvantes engendre la pression osmotique ; elle s'oppose à leur séparation par congélation, par volatilisation, ou par tout autre procédé.

Et ainsi, l'on se trouve ramené, d'une manière plus savante toutefois, aux explications de Dutrochet, de Naegeli, de Pfeffer, de De Vries et des expérimentateurs en général.

§ II. — SOLUTIONS DES SUBSTANCES ÉLECTROLYTES

Sommaire. — **82**. La pression osmotique des solutions étendues d'électrolyte est plus grande que la pression théorique. Elle est égale à celle-ci multipliée par le coefficient isotonique *i*. — **83**. Les anomalies des solutions osmotiques sont analogues aux anomalies des gaz. Elles sont confirmatives des lois. — **84**. Hypothèse d'Arrhénius. Dissociation des électrolytes. — **85**. Signification du coefficient de correction *i*. — **86**. Degré de dissociation électrolytique. Relation avec le coefficient de correction *i*. — **87**. Détermination du coefficient de correction d'une solution d'électrolyte. — **88**. Détermination du degré de dissociation d'une solution d'électrolyte. — **89**. Signification des coefficients isotoniques moyens de H. de Vies.

82. La pression osmotique des solutions étendues d'électrolyte est plus grande que celle qu'indique la théorie. Elle est égale à la pression théorique, multipliée par le coefficient isotonique i. — Indépendamment de toute idée théorique, nous avons vu (n^os^ *61* et *64*) que les lois de l'osmose ne s'appliquaient avec certitude qu'à une classe de solutions, classe d'ailleurs extrêmement nombreuse, à savoir : les substances organiques, sucres, acides, corps indifférents, liquides de l'économie, et, en plus, quelques sels minéraux, sels alcalino-terreux dérivés d'une molécule d'acide (n° *66*). La grande majorité des corps solubles par excellence : sels, acides, bases, y échappent. Ce n'est que pour la première catégorie, c'est-à-dire pour les composés non électrolytes, organiques, que les lois expérimentales sont valables.

Une règle d'une simplicité remarquable résume ces lois ; c'est à savoir que les solutions équimoléculaires exercent la même pression osmotique — ou encore, que *toute molécule, à quelque corps qu'elle appartienne, exerce en dissolution la même pression osmotique.* La pression osmotique est égale à la pression gazeuse qu'exercerait le poids du corps, supposé gazéifié dans le volume occupé par la solution.

Fallait-il admettre qu'une loi si remarquable et si bien vérifiée s'arrêtait à la limite fictive qui sépare la chimie minérale de la chimie organique ? Une telle conclusion ne devait être admise qu'à la dernière extrémité. La généralité des lois simples est, en effet, un axiome des sciences physiques.

L'examen attentif de la difficulté a déjà été fait (n° *66*). Les substances solubles électrolytes font exception à la loi, en ce sens que leur pression osmotique est plus grande qu'il ne faudrait. Par exemple, si la loi était vraie, à la température de 14° la pression osmotique d'une solution saline de NaCl contenant le poids moléculaire (58^gr^,5) dans 10 litres, devrait être de 179 centimètres de mercure ou, en atmosphères, de 2,35 H (1), puisque telle est la

(1) Nous rappelons que l'on peut connaître immédiatement, sans effort de mémoire, la pression osmotique d'un corps quelconque, en solution donnée (n° *68*).

En effet, d'après la loi de Van t'Hoff, suffisamment vérifiée en ce qui concerne les corps non électrolytes, le *corps dissous développe, dans la solution, la même pression osmotique que développerait le même nombre de molécules d'un corps quelconque, si on les gazéifiait dans le même espace.*

Ceci est vrai des gaz simples comme des autres corps auxquels s'appliquent les lois de

valeur de la pression osmotique exercée par la solution de sucre de saccharose $C^{12}H^{22}O^{11}$, équimoléculaire à la précédente, c'est-à-dire contenant le poids moléculaire 342 grammes dans le même volume 10 litres. Ou, pour parler autrement : la molécule de sucre dans 10 litres engendrant une pression osmotique de 179 centimètres de mercure ou 2,35 atm. à 14°, la molécule de chlorure de sodium dans 10 litres devrait exercer la même pression. Cela n'a pas lieu. La pression exercée par la molécule de sel dans ce volume est approximativement égale à $286^{cc},6$ de mercure ou 3,52 atmosphères. Elle est plus grande qu'il ne faudrait, dans la proportion de 268,6 à 179,1 ou de 3,52 à 2,35, c'est-à-dire, à peu près de 3 à 2.

Si, au lieu de prendre une solution étendue, nous prenions une solution de NaCl plus concentrée, nous trouverions une pression osmotique réelle toujours trop grande. Seulement, elle ne dépasserait pas autant la pression théorique normale. La majoration de 2 à 3 n'a lieu que pour des solutions moyennement diluées. Enfin, pour des solutions extrêmement diluées (poids moléculaire 58,5 dans un mètre cube), la majoration de la pression osmotique est encore plus considérable : elle atteint 4 et s'y maintient à partir de ce moment. Pour les solutions intermédiaires, la proportion de l'amplification est intermédiaire. La majoration de la pression osmotique est ainsi comprise entre $1\frac{3}{2}$ et 2.

La formule qui convient donc aux solutions moyennement étendues de chlorure de sodium et des sels de la IIe série : sels alcalins à un atome de métal par molécule (n° *66*), est

$$\pi = \frac{RT}{V} \times \frac{3}{2} \dots \text{ Coefficient isotonique moyen } \frac{3}{2}.$$

Le coefficient isotonique moyen est 2 pour les sels moyennement étendus de la IIIe série : sels alcalins à 2 atomes de métal par molécule (oxalate de potasse $K^2C^2O^4$, sulfate de potasse K^2SO^4, phosphate de potasse K^2HPO^4, tartrate de potasse $K^2C^4H^4O^6$, malate de potasse $K^2C^4H^4O^5$, etc.), et pour les sels alcalino-terreux dérivés de 2 molécules d'acide, tel le citrate de magnésie $Mg^3(C^6H^5O^7)^2$. — La formule qui donne la pression osmotique est alors

$$\pi = \frac{RT}{V} \times 2.$$

l'osmose. Or, le *volume moléculaire* de tous les corps gazeux ou gazéifiés est (n° *76*) $22^{lit},35$ à 0° et 760 millimètres, c'est-à-dire que le nombre de grammes du poids moléculaire occupe $22^{lit},35$; — la molécule-gramme a un volume de 22,35 à 0° et 760. Toutes ces expressions sont équivalentes. Ainsi : 32 grammes d'oxygène, 2 grammes d'hydrogène, 28 grammes d'azote, 35,5 de Cl et, par extension, 342 grammes de sucre (supposé vaporisé) occuperaient $22^{lit},35$ dans les conditions normales. Ramenés au volume de 1 litre, ils auraient, d'après la loi de Mariotte, une pression de 22 atm. 35. Donc, 342 grammes de sucre, dans une solution aqueuse de 1 litre à 0°, auraient donc une pression de 22 atm. 35. — 342 grammes, dans un volume 10 fois plus grand, exerceraient une pression osmotique 10 fois plus petite, soit 2,235 atmosphères à 0° — et à 14°, d'après la loi des températures, 2,35.

En général, pour les solutions moyennement étendues de sels dont le *coefficient isotonique* est i, la formule de la pression osmotique devient

$$\pi = \frac{RT}{V} \times i \ldots \quad i \text{ coefficient isotonique.} \qquad \text{(VIII)}.$$

Pour les solutions de concentration quelconque, la pression osmotique est donnée par la même formule dans laquelle i varie de 1 à la valeur du coefficient isotonique et au delà. Par exemple, pour les sels de la IIe série, R', A', i variera de 1 à $\frac{3}{2}$ et 2; pour les sels de la IIIe série, i variera de 1 à $\frac{4}{2}$ (coefficient isotonique) et à 3 ; pour les sels de la IVe série, i variera de 1 à $\frac{5}{2}$ (coefficient isotonique) et à 4.

83. *Les anomalies des solutions sont analogues aux anomalies des gaz; elles sont confirmatives des lois.* — Pour la majorité des substances minérales, acides, bases, sels, les pressions osmotiques sont plus fortes que ne le comporte la loi de Van t'Hoff, c'est-à-dire le nombre de leurs molécules dissoutes. Elles ne correspondent pas au nombre de molécules que l'on croit exister dans les solutions, mais à un nombre plus grand.

Une contradiction analogue s'est rencontrée dans l'histoire de la science à propos des propriétés des gaz. La loi d'Avogadro s'est heurtée à la même difficulté à laquelle se heurte ici la loi de Van t'Hoff.

Les gaz renferment, toutes choses égales d'ailleurs, dans un même volume, le même nombre de molécules.

Dans le litre, il y a, par exemple, à 0° et 760, n molécules. Le poids du litre est $n \times M$ (poids de la molécule) ; c'est aussi $D \times 1^{gr},293\ldots$ D étant la densité du gaz par rapport à l'air... On a donc $nM = D \times 1^{gr},293$.

Pour un autre gaz, l'hydrogène par exemple, on aura de même

$$nM' = D' \times 1^{gr},293.$$

On sait que dans le cas de l'hydrogène on a $D' = 0,0695$ et $M' = 2$ grammes,

d'où

$$\frac{M}{M'} = \frac{D}{D'} \quad \text{ou} \quad \frac{M}{D} = \frac{M}{D}$$

Or

$$\frac{M'}{D'} = \frac{2}{0,0695} = 28,88$$

d'où

$$M = D.\ 28,88 \qquad (a)$$

ou

$$D = \frac{M}{28,88}. \qquad (b)$$

Les formules (a) et (b) font donc connaître, en partant de la loi d'Avogadro, la densité du gaz ou de la vapeur D en fonction du poids moléculaire M, ou inversement.

Si l'on considère le chlorure d'ammonium AzH^4Cl [poids moléculaire $14 + 4 + 35,5 = 53,5$], sa densité de vapeur devrait être $\frac{53,5}{28,88} = 1,85$ par rapport à l'air, d'après (b).

D'après la loi d'Avogadro, la densité de vapeur du chlorure d'ammonium devrait donc être 1,85. Or, la densité observée est 1,01. — Cette anomalie préoccupait les chimistes, depuis quelque temps, lorsque Pebal en 1862 en donna l'explication. La densité que l'on observait et que l'on croyait être celle du chlorure d'ammonium n'était pas cela : le chlorure d'ammonium était dissocié dans les conditions de l'expérience, et la densité observée 1,01 était celle d'un mélange de chlorure d'ammonium, d'ammoniaque et d'acide chlorhydrique libres. Pebal démontra que telle était bien la composition de la vapeur, au moyen d'un artifice qui consistait à séparer ces divers composants en utilisant leur différence de vitesse de diffusion à travers une paroi poreuse. A défaut de cet artifice, le phénomène de dissociation échappe, car les gaz séparés à la haute température de l'opération se recombinent à température plus basse.

Plus tard, on généralisa ce phénomène de dissociation et on y trouva l'explication d'anomalies analogues pour l'hydrate de chloral, le pentachlorure de phosphore, l'acide sulfurique, etc.

Il y a donc des anomalies pour les solutions, comme il y en a eu pour les gaz. Les anomalies des gaz en ont, en définitive, confirmé les lois. De même, les anomalies des solutions confirment les lois des solutions.

Les anomalies des gaz ont été expliquées et ramenées à la règle par la découverte du phénomène de dissociation. C'est une explication du même ordre qui, d'après S. Arrhénius, conviendrait aux anomalies des électrolytes, et permettrait de les ramener sous la même loi que les solutions régulières. Le savant suédois a annoncé, en 1888, que tous les corps anomaux, à pression osmotique trop forte, dont nous avons parlé, sont dissociés au sein de leurs solutions. Cette dissociation est plus ou moins complète : elle est poussée à un degré plus ou moins marqué, — et la physico-chimie fournit, précisément, divers moyens d'apprécier ce *degré de dissociation*. Son effet, dans tous les cas, est d'augmenter le nombre de molécules ; et puisque la pression osmotique est liée à ce nombre, son augmentation expliquerait, conformément aux lois de l'osmose, la majoration de pression observée. L'apparente exception aboutirait donc en réalité, à une nouvelle confirmation de la loi.

La loi de Van t'Hoff avait permis de comparer les solutions des non-électrolytes aux gaz parfaits : l'hypothèse d'Arrhénius permet de comparer les solutions des électrolytes aux gaz dissociés.

84. Hypothèse d'Arrhénius. Dissociation des électrolytes. — Il est remarquable que les substances qui suivent régulièrement la loi fondamentale de l'osmose (loi de Van t'Hoff), les substances organiques, sont précisément celles qui échappent à la décomposition produite par le courant électrique. Et, au contraire, les corps anomaux, sels, acides, bases, la subissent facilement et se séparent en groupes qui s'isolent aux électrodes, les *ions*.

Cette séparation que l'on croyait être l'effet du passage du courant, S. Arrhénius a émis l'hypothèse qu'elle en était la cause et qu'elle préexistait à l'action électrique. Les molécules seraient, dans les solutions, naturelle-

ment dissociées en *ions*. Dans les solutions de concentration moyenne, il y en aurait un plus ou moins grand nombre de dissociées, à côté d'un certain nombre qui sont intactes. A mesure que la dilution augmente, la dissociation augmente aussi : pour une dilution suffisante, la dissociation serait complète. Les sels à acide fort et à base forte sont déjà dissociés lorsque la solution renferme le poids moléculaire dissous dans 1 000 litres ou 1 mètre cube. Ceux dont la base seule ou l'acide seul sont forts approchent de cet état. Au même degré de concentration, les sels à acide faible ou base faible en sont encore très éloignés.

Pour les solutions extrêmement étendues, le nombre des *ions* serait donc dans un rapport simple avec celui des molécules primitives du corps dissous, puisque chacune de celles-ci fournit un nombre d'ions déterminé. Par exemple, si nous considérons le chlorure de sodium NaCl, et que nous en assions une solution contenant le poids moléculaire $58^{gr},35$ dans un mètre cube (1 000 litres), cette solution pourra être considérée comme entièrement dissociée : chaque molécule aura fourni deux ions, un ion positif Na et un ion négatif Cl. Or, la pression osmotique d'une telle solution est double de ce qu'elle devrait être, ainsi que s'en est assuré Arrhénius. Elle devrait être la même que celle de la solution de sucre contenant 342 grammes dans 1 000 litres, c'est-à-dire (n° **62**), en centimètres de mercure, 1,79 ; elle est de $3^{cent},58$, exactement double. Ainsi, la pression a doublé en même temps que, par suite de la dissociation, doublait également le nombre des molécules.

De même, avec le sulfate de potasse, dont la molécule K^2SO^4 fournit trois molécules dissociées, trois ions, à savoir 1 molécule (SO^4) et deux molécules (K), la pression osmotique serait triplée. Si l'on prend en effet une solution assez étendue pour être entièrement dissociée, c'est-à-dire contenant le poids moléculaire 174 grammes dissous dans 1 mètre cube, la pression osmotique, au lieu d'être 1,79 (en centimètres de mercure), sera 5,37, c'est-à-dire le triple. Avec le phosphate de potasse K^3PO^4, dont la molécule en fournit 4, la pression osmotique sera le quadruple de la pression normale, si l'on considère la solution extrêmement étendue, complètement dissociée. Et ainsi de suite.

Pour les solutions moins étendues, on ne peut pas, en général, indiquer d'avance quelle sera la majoration de la pression osmotique, parce que l'on ne connaît pas *à priori* le degré de dissociation ; il faut le mesurer. Si on le mesure, en effet, c'est-à-dire si l'on apprécie le nombre de molécules réellement existantes dans la solution, on constate alors que la pression osmotique répond réellement à ce nombre de molécules tant complètes que dissociées. L'harmonie se trouve rétablie. La loi de Van t'Hoff prend un grand caractère de généralité. *La molécule du corps dissous se comporte toujours, par rapport à la pression osmotique, comme la molécule du gaz par rapport à la pression gazeuse. Chaque molécule du corps dissous intervient pour la même part dans la production de la pression osmotique.*

Il suffit d'entendre par molécule, aussi bien la molécule électrolytique ou ion, que la molécule chimique.

Ajoutons qu'il y a un parallélisme complet entre les diverses propriétés physiques qui sont liées au nombre des molécules : pression osmotique, tension de vapeur, point de congélation.

Le résultat a été le même en ce qui concerne les tensions de vapeur des solutions. Elles sont moindres que celles de l'eau pure ; elles subissent, du fait de la présence du corps dissous, une dépression, une chute. Chaque molécule dissoute détermine la même dépression, quel que soit le corps auquel appartienne cette molécule, à la condition d'admettre que la dissociation en *ions* est complète dans les solutions étendues, et de mettre sur le même rang les molécules électrolytiques et les molécules chimiques.

Même résultat encore pour la loi relative aux points de congélation. Grâce à l'hypothèse d'Arrhénius, il est permis de dire que chaque molécule, quelle qu'elle soit (ou plutôt dans des séries déterminées) abaisse le point de formation de la glace, de la même quantité.

85. *Signification du coefficient de correction i.* — Étant donnée une solution d'électrolyte, sa pression osmotique réelle sera plus grande que la pression théorique donnée par la formule

$$\pi = \frac{RT}{V};$$

la pression réelle sera

$$\pi_1 = \pi \times i \ldots\ i > 1$$

$$\pi_1 = \frac{RT}{V} \times i. \qquad \text{(VIII)}$$

L'inégalité de ces deux pressions théorique π et réelle π_1, d'après ce que nous venons de dire, tient à ce que le nombre réel des molécules de la solution (tant dissociées que non dissociées) s'écarte du nombre apparent estimé sans tenir compte de la dissociation. Chaque molécule (chimique ou électrochimique) exerçant la même pression osmotique, d'après la loi de Van t'Hoff généralisée par Arrhénius, le rapport de ces deux pressions sera celui des molécules libres qui y existent.

La pression π (théorique) suppose qu'il n'y a pas de molécules dissociées ; les molécules actives sont les K molécules chimiques existant dans l'unité de volume de la solution considérée ; en appelant e l'effet osmotique dû à chacune, $\pi = Ke$.

La pression réelle π_1 est due aux K_1 molécules présentes (tant intactes que résultant de dissociation) ; l'effet osmotique de chacune est le même, e, et l'on a $\pi_1 = K_1 e$ (1) d'où

$$\frac{\pi_1}{\pi} = \frac{K_1}{K} = \pi.$$

Le rapport $\frac{\pi_1}{\pi}$, c'est-à-dire le coefficient de correction i, représente donc le *rapport du nombre réel de molécules présentes* (tant *intactes* que *ions*)

(1) Ce que nous disons de l'effet osmotique peut se répéter identiquement pour l'effet d'abaissement de congélation (effet *cryoscopique*), de dépression de tension de vapeur (effet *tonométrique*), puisque, comme on l'a dit (nº *84*), ces effets obéissent, de même, à la condition du nombre moléculaire. Chaque molécule ordinaire ou ion exerce le même effet osmotique, cryoscopique, tonométrique. Les anomalies dues aux écarts du nombre de molécules, c'est-à-dire à la dissociation, se reproduisent donc identiquement pour tous les effets. L'anomalie a le même principe. La correction a la même valeur. Le coefficient i est le même dans les trois cas.

au nombre de molécules qu'il y aurait dans le même volume (par exemple unité de volume), si la dissociation n'avait pas lieu. Et ceci est, en quelque sorte, évident *à priori*, si l'on se forme de la pression osmotique l'image qu'en donne Van t'Hoff, c'est-à-dire si on la considère comme résultant du choc des molécules libres contre les parois, choc dont l'effet est proportionnel au nombre de ces molécules.

Telle est la signification du coefficient i dans la formule (VIII).

86. *Degré de dissociation électrolytique. Le coefficient de correction i s'en déduit.* — Le coefficient i exprime l'état de dissociation électrolytique de la solution. Sa valeur numérique se déduit de la mesure du *degré de dissociation d*.

On donne du degré de dissociation deux définitions, d'ailleurs concordantes :

1° Le *degré de dissociation* est le rapport du nombre des *molécules primitives* qui ont subi la dissociation au nombre initial de ces molécules, avant dissociation, dans le même volume de solution (unité de volume). — On dit, plus simplement, c'est le tant pour cent des molécules qui subissent la dissociation.

$$d = \frac{p}{q}. \qquad \text{(IX)}$$

p nombre de molécules ayant subi la dissociation;
q nombre de molécules total, initial.

Naturellement, q est plus grand que p ou au plus égal à p lorsque la dissociation est complète. $p \leqq q$... d est < 1.

2° Le *degré de dissociation est le rapport du nombre des ions présents* (dans l'unité de volume de la solution) *au nombre d'ions qui existeraient si toutes les molécules étaient dissociées*, ce qui arriverait pour une dilution suffisante.

Supposons que chaque molécule donne n *ions*; $n = 2$ dans KCl; 3 dans K^2SO^4, à savoir 2 K et (SO^4); 5 dans K^4FeCy^6, à savoir 4 K et $(F.Cy^6)$, etc.

Les p molécules dissociées donneront $n\,p$ *ions* et les q molécules $n\,q$ *ions*.

Le degré de dissociation, dans cette seconde définition, sera

$$d = \frac{np}{nq},$$

c'est-à-dire qu'il aura la même valeur que précédemment.

Le nombre p de molécules dissociées est égal à $q\,d$ d'après la définition (IX). Chacune fournissant n *ions*, le nombre d'*ions* est égal à $q.\ d.\ n$. Le nombre de molécules intactes est $q - p$. Le nombre total de molécules, tant ordinaires qu'électrolytiques, libres dans l'unité de volume de la solution est donc

$$q - p + q.d.n = q\,[1 + d\,(n - 1)].$$

Le coefficient i est, d'après ce que nous avons dit (n° 85), le rapport de ce nombre de molécules et *ions* libres au nombre q des molécules qu'il y aurait, si la dissociation n'existait pas,

$$i = 1 + d(n - 1)\ldots\ i > 1. \text{ Il varie de 1 à 4,}$$

et de là

$$d = \frac{i - 1}{n - 1} \qquad \text{(X)}$$

Le nombre *i* qui règle la pression osmotique réelle d'une solution d'électrolyte, en règle également l'abaissement réel du point de congélation, la dépression réelle de tension de vapeur (n° ***84***), la solubilité réelle. Il y a grand intérêt à le déterminer, c'est-à-dire à déterminer *d*.

87. Détermination du coefficient i d'une solution d'électrolyte. — Première méthode. Si, étant donnée une solution, on se proposait de connaître le coefficient *i* pour lui-même, on pourrait le déduire d'une mesure de pression osmotique, d'abaissement du point de congélation, de dépression de la tension de vapeur, de changement de solubilité. Disons qu'en général c'est l'inverse et que l'on ne cherche *i* que pour en déduire ces mesures. Supposons cependant ce cas.

Le procédé le plus commode est de déterminer le point de congélation réel de la solution. On peut encore, ce qui revient au même, déterminer un élément qui dépend de celui-ci, par exemple le poids moléculaire de la substance dissoute. Connaissant alors la valeur réelle du paramètre physique (pression osmotique, point de congélation, etc.), il suffira de confronter cette valeur réelle à la valeur théorique. Le rapport des deux sera *i*.

Exemple :

Supposons que l'abaissement du point de congélation produit par la solution contenant, dans 100 grammes, *c* grammes du corps dissous, soit Δ. En portant cette valeur dans la formule

$$M_1 = 18,5 \frac{c}{\Delta}$$

qui sera expliquée plus loin, on aura le poids moléculaire M_1 du corps dissous. Ce poids ne répondra pas au vrai poids chimique M. Pour avoir M, il faudra multiplier M_1 par un certain nombre ; ce sera précisément le nombre *i*.

88. Détermination du degré de dissociation d'une solution d'électrolyte. — Si l'on a déterminé *i*, on peut facilement en déduire le degré de dissociation *d*, connaissant le nombre *n* d'*ions* que peut fournir la molécule du corps dissous. On a, en effet, d'après la formule (X) (n° ***86***) :

$$d = \frac{i - 1}{n - 1}.$$

Mais la détermination du degré de dissociation peut se faire directement, par une mesure de conductibilité électrique. La conductibilité électrique d'une solution d'électrolyte est encore une des propriétés liées à la condition du nombre moléculaire.

On peut mesurer la conductibilité moléculaire d'un électrolyte. Il suffit, après avoir déterminé la conductibilité électrique de la solution μ_v, d'étendre celle-ci jusqu'à ce que cette conductibilité atteigne sa valeur limite μ_∞, par dilution suffisante. Le rapport de ces deux chiffres, d'après la loi d'Ostwald (Voy. *Électrolyse*), fait connaître le degré de dissociation.

$$d = \frac{\mu_v}{\mu_\infty}. \qquad \text{(XI)}$$

μ conductibilité moléculaire de la solution ;
$\mu\infty$ conductibilité de la solution étendue jusqu'à dissociation complète.

89. ***Signification des coefficients isotoniques moyens de H. de Vries.*** — Nous avons dit (n° **84**) que, dans les cas des solutions d'électrolytes très étendues, la théorie permettait de prévoir la majoration que subit la pression osmotique. Elle est due, en effet, à la dissociation complète du corps dissous. On sait comment se dissocie la molécule du corps, et par conséquent quelle est de ce chef l'augmentation relative du nombre des molécules libres dans la solution. Par exemple, chaque molécule de chlorure de sodium donne deux molécules dissociées ou ions : la dissociation complète double, par conséquent, le nombre total de molécules libres, et par suite la pression osmotique. Le coefficient i de correction est théoriquement égal à 2 ; en fait, il en diffère d'une manière appréciable : sa valeur est 1,80.

Mais, s'il s'agit de solutions moins étendues, et, par suite, incomplètement dissociées, on ne sait pas *à priori* quelle sera l'augmentation du nombre des molécules, parce que l'on ne sait pas dans quelle proportion se fait la dissociation. On ne connaît pas, d'avance, le degré de dissociation. Il faut le déterminer, dans chaque cas particulier.

Il y aurait, cependant, à cette nécessité, une exception remarquable, si la loi des coefficients isotoniques moyens de De Vries était rigoureuse. Cette loi s'applique aux solutions décinormales ou dont la concentration oscille autour de celle-là (de 0,50 à 2).

La loi affirme que les solutions salines (dont nous venons d'indiquer les limites de concentration) se divisent en quatre séries dont les coefficients isotoniques — qui sont les coefficients de correction i — sont respectivement 1, $\frac{3}{2}$, 2, $\frac{5}{2}$.

Quelle serait la signification d'une telle particularité?

Considérons la série II ; le coefficient isotonique moyen est $\frac{3}{2}$. La pression osmotique réelle des solutions salines telles que NaCl, de formule R′,A′, est majorée : elle serait $\frac{3}{2}$ de la pression théorique.

Qu'indique ce résultat ? D'après la loi de la concentration moléculaire, il indiquerait qu'il y a une augmentation de nombre des molécules dans la proportion de 3 à 2, par suite de dissociation. Il faut pour cela que le degré de dissociation soit $\frac{1}{2}$, c'est-à-dire qu'il y ait une *moitié* des molécules de NaCl qui ait subi la dissociation. En effet, si n est le nombre initial des molécules de la solution, le nombre total des éléments, molécules intactes et ions, sera $\frac{n}{2} + 2\,\frac{n}{2} = \frac{3n}{2}$.

Ainsi, *dans les limites de concentration où De Vries a exécuté ses experiences de plasmolyse, c'est-à-dire autour de la solution décinormale, une moitié des molécules aurait subi la dissociation.*

Au delà, cette fixité ne se soutient pas. Si la dilution augmente notablement, le coefficient croît — et pour une dilution 100 fois plus grande (poids moléculaire 58,5 de NaCl dans 1 000 litres) la dissociation est complète. Le coefficient i est devenu égal à 2 (en réalité 1,80). La pression osmotique a doublé.

La même observation vaut pour la série III, comprenant les sels de formule $2R',A''$ et $R'',2A'$. Là encore, *il faut qu'une moitié des molécules ait subi la dissociation*. Chaque molécule dissociée donne trois ions. S'il y a, pour les solutions salines considérées, une moitié des molécules dissociées, le nombre des éléments libres sera $\frac{n}{2} + \frac{n}{2} \times 3 = \frac{4n}{2}$; le coefficient isotonique sera 2 ; la pression osmotique sera le double de ce qu'elle serait s'il n'y avait pas dissociation. C'est précisément ce qui arrive.

Si la dilution devenait plus grande ; si elle devenait 100 fois plus grande, la dissociation deviendrait complète ; le coefficient de correction s'élèverait à 3 ; la pression osmotique deviendrait triple.

Même observation pour la série IV. — Une moitié des molécules serait dissociée.

De telle sorte que si la règle de De Vries était rigoureuse, elle conduirait à cette conséquence que *les solutions du plus grand nombre des sels* (*en concentration décinormale ou voisine de celle-là*) *seraient à demi dissociées*. Une moitié des molécules serait décomposée en ions.

Cette conclusion est manifestement erronée ; elle ne peut présenter qu'un semblant de vérification. Elle met en évidence le caractère d'approximation grossière de la règle de De Vries. Et ce défaut de rigueur tient à deux causes. La première, c'est que le procédé de la plasmolyse comporte des incertitudes assez grandes, de $\frac{1}{30}$ à $\frac{1}{10}$, sur les concentrations isotoniques, et par suite sur les coefficients isotoniques expérimentaux. La seconde, c'est que les coefficients isotoniques moyens adoptés par De Vries diffèrent des coefficients isotoniques expérimentaux, dans des proportions assez grandes, ainsi que l'on peut s'en assurer en consultant les tableaux (nos **90** et **91**). Les deux erreurs peuvent s'ajouter.

Les physiologistes qui appliquent assez fréquemment la règle très commode de De Vries doivent être prévenus du degré d'approximation qu'elle présente, et sur lequel l'auteur lui-même ne s'est pas mépris.

§ III. — TABLEAUX DES DONNÉES OSMOTIQUES OBTENUES PAR DÉTERMINATIONS EXPÉRIMENTALES DIRECTES

90. Tableaux des données osmotiques expérimentales. — Nous donnons ici deux tableaux qui résument les données osmotiques expéri-

mentales. Les éléments en sont empruntés surtout à de Vries et à Pfeffer.

En ce qui concerne le tableau I, les légendes se comprennent d'elles-mêmes pour les quatre premières colonnes. Pour la cinquième, on n'a qu'à se rappeler la signification de la solution type (n° **47**).

Nous avons dit (n° **47**) que parmi les diverses solutions plus ou moins étendues ou concentrées que l'on peut faire d'une substance donnée dans l'eau, il y en a une qui se distingue et qui est en quelque sorte fondamentale au point de vue de la comparaison des substances entre elles : c'est celle qui répond à la *concentration moléculaire*, c'est-à-dire au poids moléculaire dissous dans un même volume de solution (100 cent. cubes, 1 litre, ou plus souvent 10 litres). C'est cette dernière, c'est-à-dire la solution décinormale, que l'on prend pour type. *La solution type est celle qui contient le poids moléculaire du corps exprimé en grammes* (*la molécule-gramme*) *dissous dans 10 litres de solution.*

D'autre part, *la concentration en volume d'une solution est le nombre de grammes* C *du corps dissous dans 100 centimètres cubes de cette solution.*

Cette convention a pour résultat de faire que la *concentration en volume* de la solution type est la 100e partie de la concentration moléculaire, la 100e partie du poids moléculaire.

$$C = \frac{M}{100}.$$

Par exemple, la concentration de la solution type de saccharose est 3,42, celle de la glycérine est 0,92, celle de l'azotate de potasse est 1,01.

Quelques auteurs ont pris l'habitude d'exprimer les concentrations d'une autre manière. De Vries, par exemple, les exprime en molécules-grammes, au lieu de les exprimer en grammes; et en litres, au lieu de 100 centimètres cubes.

Par exemple, une solution de glycérine de degré de concentration 0,21 indique une solution contenant $\frac{21}{100}$ de 92 grammes (92, poids moléculaire de la glycérine) par litre. Une solution de nitre de concentration 0,14 indique une solution contenant par litre $\frac{14}{100}$ du poids moléculaire du nitre, qui est 101 grammes. C'est donc $\frac{14}{100} \times 101$ grammes.

Cette manière de faire est très rationnelle quand on a en vue de comparer les solutions au point de vue osmotique. Ainsi, dans l'exemple précédent, la solution 0,21 de glycérine est *isotonique* à la solution 0,14 de nitre : l'une et l'autre déterminent, en effet, la *plasmolyse commençante* dans les cellules des feuilles du *Begonia manicata* que l'on y introduit. Les concentrations 0,21 de glycérine et 0,14 de nitre sont isotoniques.

On voit immédiatement que 0,21 de molécule de glycérine équivaut, au point de vue osmotique, à 0,14 de molécule de nitre, c'est-à-dire que 3 parties de l'une équivalent à 2 parties de l'autre. La pression développée par la molécule de nitre sera donc 3 si la pression développée

Tableau I

Résumant les données osmotiques expérimentales.

I Substances.	II Formule chimique.	III Poids moléculaire	IV Pression osmotique des solutions contenant 1 gr. dans 100 c. c.		V Pression osmotique en centimètres Hg de la solution type. Pression correspondant à 1 molécule dans 10 litres.	VI Coefficient isotonique.	
			En atm.	En cent. de Hg.		Adopté.	Trouvé.
I *Corps organiques.*							
1. Sucre de canne........	$C^{12}H^{22}O^{11}$	342	0,69	52,4	178,8	2	2 (1)
2. Dextrose et lévulose...	$C^6H^{12}O^6$	180	1,25	99,5	179,1	2	2
3. Glycérine............	$C^3H^8O^3$	92	2,54	193,3	177,8	2	1,89
4. Acide citrique.........	$C^6H^8O^7$	192	1,23	93,3	179,1	2	2,14
5. Acide tartrique........	$C^4H^6O^6$	150	1,57	119,4	179,1	2	2,14
6. Acide malique.........	$C^4H^6O^5$	134	1,76	133,7	179,1 } $\pi_m = 179$	2	2,10
7. Acide oxalique........	$C^2H^2O^4$	90	2,62	119,0	179,1	2	»
Sels de formule : R″,A″.							
8. Malate de magnésium..	$MgC^4H^4O^5$	156	1,51	114,8	179,0	2	2,0
9. Sulfate de magnésium.	$MgSO^4$	120	1,93	149,2	179,0	2	2,05
II. *Sels de formule :* R′,A′.							
10. Azotate de potassium..	$KAzO^3$	101	3,50	266	268,6	3	3,18
11. Chlorure de potassium.	KCl	74,5	4,77	363,0	268,0	3	3,18
12. Citrate monopotassique.	$KH^2C^6H^5O^7$	130	2,72	206,7	268,7 } $= \pi_m \times \frac{3}{2}$	3	3,24
13. Azotate de sodium.....	$NaAzO^3$	85	4,16	316,1	268,6	3	3,18
14. Chlorure de sodium...	NaCl	58,5	6,09	463,2	268,6	3	3,18
15. Chlorure d'ammonium.	AzA^4Cl	53,5	6,67	506,3	268,3	3	3,18
III *Sels de formule :* 2R′,A″.							
16. Oxalate dipotassique...	$K^2C^2O^4$	166	2,85	216,7	359,7	4	4,18
17. Sulfate dipotassique....	K^2SO^4	174	2,72	206,7	359,6	4	4,14
18. Phosphate dipotassique.	K^2HPO^4	174	2,72	206,7	359,6	4	4,21
19. Tartrate dipotassique..	$K^2C^4H^4O^6$	226	2,09	159,0	359,3	4	4,24
20. Oxalate dipotassique...	$K^2C^4H^4O^5$	210	2,25	171,9	359,3	4	4,37
21. Citrate dipotassique....	$K^2HC^6H^5O^7$	268	1,75	133,6	358,0 } $= \pi_m \times \frac{4}{2}$	4	4,34
22. Citrate de magnésium.	$Mg^3(C^6H^5O^7)^2$	450	1,05	79,7	358,6	4	4,12
Sels de formule : R″,2A′.							
23. Chlorure de magnésium.	$MgCl^2$	95	4,98	374,4	355,6	4	4,60
24. Chlorure de calcium....	$CaCl^2$	111	4,26	323,6	359,1	4	4,60
IV *Sels de formule :* 3R′,A‴							
25. Citrate tricalcique.....	$K^3C^6H^5O^7$	306	1,92	146,0	446,7 $= \pi_m \times \frac{5}{2}$	5	5,32
V *Colloïdes à poids moléculaire inconnu.*							
26. Gomme arabique......	»	»	0,085	6,5	(2)	(3)	
27. Dextrine............	»	»	0,218	16,6			

(1) Par convention.
(2) Cette colonne donne la pression osmotique de la solution contenant le poids moléculaire dans 10 litres de solution.
C'est la pression *osmotique moléculaire, c'est-à-dire correspondant à 1 molécule du corps dissous*, π_m.
Les coefficients isotoniques en ressortent.
(3) Coefficient isotonique ou coefficient de correction, nombre par lequel il faut multiplier la pression osmotique théorique pour avoir la pression réelle.

par la molécule de glycérine, dissoute dans le même volume, est 2. — Le coefficient isotonique du nitre par rapport à la glycérine est $\frac{3}{2}$. C'est le rapport inverse des *concentrations isotoniques*, 0,14 et 0,21 (1).

Dans le tableau précédent, les corps sont divisés en cinq séries pour lesquelles les coefficients isotoniques sont respectivement 1, $\frac{3}{2}$, 2, $\frac{5}{2}$... La première comprend les substances organiques et les sels de formule R″,A″ ; la seconde comprend les sels de formule R′,A′ ; la troisième les sels de formule 2R′,A″ et 2A′,R″ ; la quatrième les sels de formule 3R′,A‴. — Dans ces formules, A′, A″, A‴ représentent les molécules d'acide monobasique, bibasique, tribasique ; R′, R″, R‴, les métaux monovalent, divalent, trivalent.

91. Tableau des données osmotiques des différentes substances rapportées à l'azotate de potasse pris comme étalon osmotique. — L'azotate de potasse ou salpêtre $KAzO^3$ présente une particularité qui a contribué à le faire prendre comme terme de comparaison (comme unité, peut-on dire) dans les mesures isotoniques et en général dans les mesures osmotiques. Pfeffer et de Vries surtout s'en servent comme étalon, d'une manière habituelle. Ils disent, par exemple, que la pression osmotique d'une solution s'exprime, en salpêtre, par telle ou telle valeur, ou, ce qui revient au même, que la solution considérée est isotonique à une solution de salpêtre de telle ou telle concentration.

Il y a plusieurs raisons de ce choix, à savoir : la commodité, la facilité à obtenir le produit pur, etc. Il y a, en outre, celle-ci, que la solution type de ce corps offre précisément, à très peu près, l'unité de concentration, la concentration égale à 1. En effet, le poids moléculaire du salpêtre est égal à 101. La solution type (c'est-à-dire de concentration moléculaire) contient 101 grammes dans 10 litres ; sa *concentration est exprimée par 1,01*, c'est-à-dire par l'unité (au centième près).

Théoriquement, si toutes les substances suivaient la loi de Van t'Hoff, si toutes les molécules s'équivalaient osmotiquement, la solution isotonique à la solution type d'azotate serait la solution type de la substance. En fait, à cause des coefficients isotoniques, les solutions qui s'équivalent sont, quant à leur concentration, en raison inverse de ces coefficients.

Par exemple, pour le sucre [($C^{12}H^{22}O^{11} = 342$), non électrolyte, coefficient 2], la solution type (342 grammes dans 10 litres) développera une pression osmotique 2, celle de l'azotate de potasse (101 grammes dans 10 litres) étant 3 : les solutions contenant 342 grammes $\times$ 3 de sucre et 101 grammes $\times$ 2 d'azotate, dans le même volume, développeront la même pression, seront isotoniques.

La solution de saccharose isotonique à la *solution type* d'azotate de potasse contient donc par 10 litres, non pas 342 (ou par 100 centimètres cubes, $3^{gr},42$), mais ce nombre multiplié par $\frac{3}{2}$, c'est-à-dire 513 grammes dans 10 litres ou $5^{gr},13$ dans 100 centimètres cubes.

En résumé, la concentration du saccharose 5,13 est isotonique à la concentration 1,01 d'azotate de potasse. De même sont isotoniques à cette dernière : la concentration $0,92 \times \frac{3}{2} = 1,39$ de glycérine ; la concentration $2,88 = 1,92 \times \frac{3}{2}$ d'acide citrique ($C^6H^8O^7 = 192$) ; la concentration $2,25 = 1,50 \times \frac{3}{2}$ d'acide tartrique ($C^4H^6O^6 = 150$), etc.

Dans une autre série (coefficient 4), on aura comme isotoniques à la concentration 1 (en

(1) On dit *concentrations isotoniques* pour « concentrations de solutions qui sont isotoniques ».

réalité $1^{gr},01$ dans 100 de la solution d'azotate de potasse de coefficient 3), les solutions suivantes : concentration $1,24 = 1,66 \times \frac{3}{4}$ d'oxalate de potassium ($K^2C^2O^4 = 166$), concentration $1,30 = 1,74 \times \frac{3}{4}$ de sulfate de potasse ($K^2SO^4 = 174$) ; concentration $1,69 = 2,26 \times \frac{3}{4}$ de tartrate dipotassique ($K^2C^4H^4O^6 = 226$), etc.

1° Une substance étant donnée, on la comparera à l'azotate de potasse, en cherchant la concentration de la solution de cette substance qui est isotonique à la solution type d'azotate, laquelle est aussi la solution de concentration égale à l'unité.

Ce sont ces nombres qui sont inscrits dans la colonne IV du tableau II. En appelant M le poids moléculaire de la substance, les nombres de cette colonne ont pour expression $\frac{M}{100} \times$ rapport inverse $\frac{3}{c}$ des coefficients isotoniques de la substance c et de l'azotate de potasse 3.

En fait, les expériences d'isotonie ont donné des chiffres voisins de ceux-ci. Ils n'en diffèrent que dans la proportion où les coefficients isotoniques trouvés diffèrent des coefficients adoptés (colonne VI, tableau I).

2° Il y a une seconde manière de comparer une substance à l'azotate, au point de vue osmotique : c'est de déterminer la *valeur osmotique de la substance en azotate*; ceci veut dire qu'on détermine le rapport qui existe entre l'effet osmotique développé par la solution de concentration 1 de la substance et la solution type d'azotate qui est aussi sensiblement la solution de concentration 1 (exactement de la solution de concentration 1,01).

Par exemple, pour le sucre de saccharose, ce rapport est 0,195. La valeur du sucre en azotate de potasse est 0,195. L'effet produit par la solution 1 de sucre est les 0,195 de l'effet produit par la solution 1,01 d'azotate.

La valeur de l'acide malique en azotate est 0,50, ce qui veut dire qu'ayant l'effet produit par la solution type (à 1,01 p. 100 d'azotate), l'effet produit par la solution de même concentration 1 d'acide malique est la moitié du précédent.

Ce sont ces nombres qui sont inscrits dans la colonne V. En définitive, ces nombres expriment les rapports de chacun des nombres de la colonne IV du tableau I à l'un d'eux, celui qui correspond à l'azotate.

Tableau II

Des données osmotiques rapportées à l'azotate de potasse pris comme étalon osmotique.

I Substances.	II Formule chimique.	III Poids moléculaire.	IV Concentration de la solution de la substance, qui est isotonique à la solution type d'azotate de potasse $\frac{M}{100} \times \frac{3}{C}$.	V Valeur osmotique de la substance en azotate de potasse.	VI Coefficients isotoniques par rapport à celui de l'azotate de potasse pris égal à 3. Trouvés.	 Adoptés.
Azotate de potasse.....	$KAzO^3$	101	1,01	»	3	3
I *Substances organiques :*						
1. Sucre de canne....	$C^{12}H^{22}O^{11}$	342	5,13	0,195	1,88	—2
2. Glucose et lévulose.	$C^6H^{12}O^6$	180	2,70	0,37	1,88	2
3. Glycérine	$C^3H^8O^3$	92	1,39	0,73	1,78	2
4. Acide citrique......	$C^6H^8O^7$	192	2,88	0,35	2,02	2
5. Acide tartrique.....	$C^4H^6O^6$	150	2,25	0,44	2,02	2
6. Acide malique	$C^4H^6O^5$	134	2,01	0,50	1,98	2
7. Acide oxalique.....	$C^2H^2O^2$	90	1,35	0,74	»	2
Sels de formule : R″,A″.						
8. Malate de magnésium............	$MgC^4H^4O^5$	156	2,34	0,43	1,88	2
9. Sulfate de magnésium	$MgSO^4$	120	1,80	0,56	1,96	2
II *Sels de formule :* R′,A′.						
10. Azotate de potassium	$KAzO^3$	101	1,01	0,99	3	3
11. Chlorure de potassium	KCl	74,5	0,74	1,3	3	3
12. Citrate monopotassique...........	$KH^2C^6H^5O^7$	130	1,30	0,77	3,05	3
13. Azotate de sodium.	$NaAzO^3$	85	0,85	1,18	3	3
14. Chlorure de sodium.	NaCl	58,5	0,58	1,71	3	3
15. Chlorure d'ammonium............	AzH^4Cl	53,5	0,53	1,87	3	3
III *Sels de formule :* 2R′,A″.						
16. Oxalate dipotassique	$K^2C^2O^4$	166	1,24	0,80	3,93	4
17. Sulfate dipotassique.	K^2SO^4	174	1,30	0,77	3,90	4
18. Phosphate dipotassique	K^2HPO^4	174	1,30	0,77	3,96	4
19. Tartrate dipotassique............	$K^2C^4H^4O^6$	226	1,69	—0,59	3,99	4
20. Malate dipotassique.	$K^2C^4H^4O^5$	210	1,57	—0,63	4,11	4
21. Citrate dipotassique.	$K^2HC^6H^5O^7$	268	2,01	0,50	4,08	4
22. Citrate de magnésium............						
Sels de formule : R″,2A′.						
23. Chlorure de magnésium	$MgCl^2$	95	0,71	1,40	4,33	4
24. Chlorure de calcium.	$CaCl^2$	111	0,83	1,20	4,33	4
IV *Sels de formule :* 3R′,A‴.						
25. Citrate tricalcique..	$K^3C^6H^5O^7$	306	1,84	0,54	5,01	5
V *Colloïdes à poids moléculaire inconnu :*						
26. Gomme..........	»	»	41,32	»	»	»
27. Dextrine..........	»	»	16,18	»	»	»

CHAPITRE III

DÉTERMINATIONS INDIRECTES DE LA PRESSION OSMOTIQUE

SOMMAIRE. — **Principe de la mensuration indirecte, 92. — § 1. Tonométrie, 93-120. — § 2. Cryoscopie, 121-169.**

92. Principe de la mensuration indirecte. La pression osmotique peut se déduire de la mesure des grandeurs qui sont fonction du nombre de molécules. — La pression osmotique, et, d'une façon générale, les phénomènes de l'osmose, constituent en quelque sorte une propriété *virtuelle* ou *adventive* des solutions, qui ne peut devenir réelle que si les conditions nécessaires sont réalisées, c'est-à-dire s'il y a intervention d'une membrane plus ou moins hémiperméable séparant deux solutions différentes.

La mesure directe de la pression osmotique exige une membrane hémiperméable consolidée et affermie par un soutien perméable tel qu'une paroi de terre poreuse. La préparation de cet appareil osmométrique est délicate et hasardeuse : le maintien de la température, la mesure exacte des pressions présentent aussi des difficultés. L'opération, au résumé, n'est pas courante. Il n'y a qu'un petit nombre d'expérimentateurs qui aient réalisé des mesures osmométriques directes.

Au contraire, les mesures indirectes sont faciles. Elles constituent des déterminations habituelles dans les laboratoires.

Les mesures indirectes de la pression osmotique d'une solution se déduisent des déterminations :

D'abaissement de tension de vapeur ou *tonométriques* ;

D'abaissement du point de congélation ou *cryoscopiques* ;

De conductibilité électrique (dans le cas d'électrolytes).

Le principe de cette méthode indirecte est facile à saisir. De Vries le premier a établi, Van t'Hoff et Arrhénius ont généralisé et étendu cette proposition, à savoir que : *la pression osmotique est une fonction du nombre de molécules*. M. Raoult, de son côté, avait énoncé la même proposition en ce qui concerne la dépression de la tension de vapeur du dissolvant par le corps dissous, et l'abaissement du point de congélation. Arrhénius et Ostwald ont mis en lumière la même vérité pour la conductibilité électrique, Nernst pour les solubilités.

On conçoit, *à priori*, que la relation de ces différentes grandeurs avec le nombre moléculaire établisse par cela même une relation de ces grandeurs entre elles. Fonctions, les unes et les autres, du nombre de molécules, elles deviennent fonctions les unes des autres. La seule difficulté consiste à faire apparaître la nature exacte de cette relation, à préciser la forme de la fonction. Ce résultat obtenu, on pourra alors, de l'une des grandeurs, déduire les autres.

Il est possible de serrer de plus près la relation de ces phénomènes entre eux. Reprenons la figure du nº **78**. Nous avons dans le vase cylindrique un dissolvant, l'eau B, qui occupe la partie supérieure; une solution A qui occupe la partie inférieure; entre les deux, un piston hémiperméable chargé de poids indiqué par une simple ligne. La figure le représente dans deux positions successives (1) et (2). A l'état d'équilibre, la pression osmotique contre-balance exactement la pression qui s'exerce sur le cylindre.

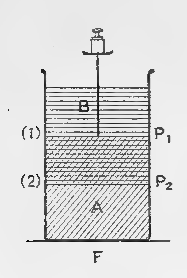


Fig. 443.

Considérons les deux positions d'équilibre successives du piston P_1, P_2. Au moment de l'équilibre en (1), la pression osmotique de la solution située au-dessous, en P_1F, contre-balance le poids du piston et de l'eau qui le surnage : appelons-la π_1.

Pour amener le piston à la position (2), il faudra exercer un supplément de pression qui séparera du corps dissous l'eau dissolvante et la fera passer dans le bief supérieur. Arrivé en (2), l'équilibre s'établira; la pression osmotique π_2 de la solution P_2F fait équilibre au poids initial augmenté des poids additionnels qui ont agi pendant le mouvement. Ces poids ont pour expression $\pi_2 - \pi_1$, différence des pressions osmotiques correspondant aux positions (1) et (2) : le travail exécuté par le piston peut s'évaluer au moyen du produit de la force $\pi_2 - \pi_1$ par le déplacement.

D'autre part, demandons-nous à quelle opération a été dépensé ce travail; c'est évidemment à séparer le corps dissous du dissolvant dans le volume de solution initiale (1) P_1 (2) P_2.

Ainsi, *les variations de la pression osmotique permettent de mesurer le travail nécessaire pour séparer la substance soluble de son dissolvant.*

D'autre part, cette séparation du corps dissous d'avec le dissolvant peut être réalisée de diverses manières (réversibles). Par exemple, l'évaporation, la formation de vapeur qui enlève le dissolvant est un de ces procédés. Un autre moyen de réaliser la même séparation consistera à faire congeler l'eau qui, en devenant glace, abandonnera le corps dissous. Un autre moyen encore d'exécuter le même travail sera de placer dans la solution un autre corps qui, pour se dissoudre, devra en quelque sorte enlever le dissolvant au premier corps dissous; enfin, un dernier procédé consistera à faire passer un courant électrique qui rassemblera les éléments du corps dissous aux deux électrodes.

Il est clair qu'en évaluant ces différents travaux au moyen des éléments correspondants, tension de vapeur, point de congélation, etc..., et en écrivant que ces travaux sont égaux pour la même quantité de dissolvant et du corps dissous, on aura les relations cherchées de ces diverses grandeurs entre elles et avec la pression osmotique.

§ I. — TENSION DE VAPEUR DES DISSOLUTIONS. — TONOMÉTRIE

SOMMAIRE. — *a*. **Dissolutions véritables.** — **93**. Considérations générales. — **94**. La présence d'une substance dissoute élève le point d'ébullition de la solution et déprime la tension de vapeur du dissolvant. — **95**. Démonstration théorique de l'abaissement de la tension de vapeur du dissolvant par la présence du corps dissous. — **96**. Relation entre la pression osmotique et la dépression tonométrique. — **97**. Programme de la tonométrie. — **98**. Procédés de mesure. — A. Méthode ébullioscopique. — B. Méthode statique. — C. Autres méthodes. — **99**. Limite de précision de la tonométrie. — **100**. Loi des températures de von Babo. — **101**. Loi des concentrations de Wüllner. — **102**. Concentrations moléculaires de Raoult. — **103**. Interprétation des lois de Babo et de Wüllner, au point de vue moléculaire. Loi de Raoult et Recoura. — **104**. A. Correction de la loi de Wüllner. — B. Règle de Raoult et Recoura. — C. Résultats expérimentaux. — D. Cas où la loi de Wüllner s'applique sans modification. — **105**. Lois de Raoult. Restrictions. — **106**. Dépression de vapeur dans le cas des solutions étendues. — **107**. Applications de la tonométrie : 1° détermination des densités de vapeurs saturées; 2° détermination des poids moléculaires; 3° détermination de la pression osmotique. — **108**. Dépression moléculaire de la tension de vapeur. — **109**. Élévation du point d'ébullition des solutions. L'élévation moléculaire est la même pour le même dissolvant. Formule d'Arrhénius. — **110**. Relation entre l'élévation du point d'ébullition et l'abaissement du point de congélation d'une solution. — **111**. Relation entre la dépression relative de vapeur et l'abaissement du point de congélation d'une solution. — *b*. **Pseudo-dissolutions. Solutions salines.** — **112**. Anomalies des pseudo-solutions. Courbes des dépressions moléculaires. — **113**. Première anomalie : majoration de la dépression relative de vapeur. *Exception : anomalie par défaut.* — **114**. Explication de l'anomalie par excès : hypothèse de la dissociation en ions. Valeur dépressive égale de tous les ions et de toutes les molécules. — **115**. Degré de dissociation des diverses catégories de sels pour des concentrations moléculaires comparables. — **116**. Théorie actuelle de S. Arrhénius. Théorie primitive de F. Raoult. — **117**. Conséquences de la théorie d'Arrhénius. Constance du degré d'ionisation malgré les variations de la concentration, pour les solutions typiques. — **118**. Seconde anomalie des solutions d'électrolytes : variation de la dépression moléculaire de vapeur du dissolvant avec la concentration de la solution. — **119**. Explication de la seconde anomalie des pseudo-solutions salines : hypothèse de l'hydratation. — **120**. Solutions des sels dans les autres solvants : alcool, éther, acétone, etc.

a. Dissolutions véritables.

93. ***Considérations générales.*** — Tonométrie signifie proprement : mesure des tensions. Ce serait, en général, la mesure et l'étude des tensions des forces élastiques des vapeurs émises par les liquides purs ou mélangés; mais on restreint, en fait, son objet à la considération des liquides volatils tenant en dissolution des corps fixes. Et, même pour la physiologie, l'objet se réduit encore plus : la tonométrie, comme l'osmose, est bornée à l'examen des solutions aqueuses.

L'eau est sensiblement fixe à 40° au-dessous de 0; la glace, en effet, à cette température n'émet pas de vapeurs dont la force élastique soit appréciable. Mais déjà à — 30° il en sort une vapeur dont la force élastique, en colonne de mercure, est $0^{mm},36$; à 0° la tension de la vapeur émise par la glace, aussi bien que par l'eau liquide, est de $4^{mm},6$; elle augmente rapidement : à 100°, elle est de 760 millimètres; et, si la pression normale extérieure est aussi de 760 millimètres, l'eau entre en ébullition.

L'eau est donc fixe à 140° au-dessous de son point d'ébullition sous la pression normale; au-dessus de — 40° et jusqu'à 0°, elle existe à la fois à l'état solide et à l'état de vapeur; à 0°, elle existe sous les trois états; de

0° à 100°, elle est à la fois liquide et vapeur : au-dessus de 100°, elle n'est que vapeur. Cela, dans les conditions ordinaires de pression.

Si les solutions aqueuses intéressent surtout le biologiste, elles ne sont point l'objet unique de la tonométrie; elles n'en sont même point l'objet le plus avantageux. La tonométrie envisage une infinité d'autres dissolvants que l'eau. Les solutions aqueuses ne constituent qu'un cas particulier; il faudrait même dire : *un cas aberrant*. Elles paraissent échapper aux lois générales : du moins, cela est-il vrai des solutions aqueuses les plus ordinaires, celles des acides forts, des bases fortes, des sels, en un mot des électrolytes. Les solutions des substances organiques (non électrolytes) seules rentrent dans la loi commune.

De fait, l'étude tonométrique des dissolutions aqueuses est restée à peu près impuissante dans les mains d'expérimentateurs tels que von Babo, Wüllner, Tammann, Pauchon, Emden, Dieterici. Au contraire, la considération des solvants autres que l'eau a conduit M. Raoult à des formules qui embrassent mieux les faits. Mais les lois tout à fait générales ne se sont manifestées que lorsque l'examen des nombres expérimentaux a été vivifié par l'idée théorique, c'est-à-dire, comme nous allons le voir, par l'introduction de l'hypothèse moléculaire.

94. *La présence d'une substance dissoute élève le point d'ébullition de la solution et déprime la tension de vapeur du dissolvant.* — C'est un fait d'observation vulgaire que, lorsque l'on dissout dans l'eau un corps fixe, non volatil, un sel, l'eau bout plus difficilement; ou, pour parler plus exactement, elle n'entre en ébullition qu'à une température plus élevée.

L'eau pure bout à 100° sous la pression normale; l'eau saturée de sel ordinaire ne bout qu'à 109°.

Il y a *retard à la vaporisation, élévation du point d'ébullition*. La même chose est vraie pour tout autre dissolvant (1).

Ce fait peut se traduire d'une autre façon, en disant que la présence du corps dissous diminue la tension de vapeur émise par l'eau, à toute température. Le point d'ébullition d'une liqueur aqueuse, eau pure ou solution, c'est le degré où la force élastique de la vapeur d'eau — toujours accrue à mesure que la température s'élève (2) — a atteint progressivement la pression normale (760 millimètres de Hg). La vapeur émanée de l'eau pure atteint cette pression dès que la température arrive à 100°; la vapeur émanée de la solution n'atteint pas encore cette valeur (760 millimètres) à 100°, mais seulement à 109°. Sa pression était donc plus petite à 100° que celle de l'eau pure. Elle était plus petite aussi aux autres températures. On a même admis qu'elle était diminuée, à toute autre température, dans la même proportion où elle l'est à 100° (Prinsep).

(1) Il faut noter, toutefois, que, quoique la température d'ébullition de la solution salée soit supérieure à 100° (109° à la pression normale pour la solution saturée de NaCl), la température de la vapeur qui s'en échappe est toujours de 100°, comme si l'eau était pure (Rudberg).

(2) L'accroissement de température accroît toujours la pression de la vapeur; mais la loi suivant laquelle se fait cet accroissement, pour les différents corps, n'est pas connue.

Par exemple : une solution de sel marin de poids spécifique 1,096 a à 100° une tension de vapeur qui est les 9/10es de celle de l'eau pure (Gay-Lussac), et à toute autre température sa tension est encore les 9/10es de celle de l'eau pure (Prinsep).

L'influence du corps dissous consiste donc à retenir le dissolvant : il crée la nécessité d'une action plus énergique, d'une température plus haute pour amener la vapeur qui en émane au même degré de tension. Cette influence se traduit par l'*élévation du point d'ébullition sous la même pression*, ou, ce qui revient au même, par la *diminution de la tension de vapeur* à la même température.

95. Démonstration théorique de l'abaissement de la tension de vapeur du dissolvant par la présence du corps dissous. — Le fait que la tension de vapeur d'eau émanée d'une solution est inférieure à la tension de l'eau pure n'est pas seulement une vérité d'expérience ; elle est de nécessité rationnelle et peut être démontrée théoriquement. Cette démonstration, empruntée à Nernst, consiste à faire voir que si la tension de vapeur d'eau émise par la solution n'était pas plus petite que celle qui est émise par l'eau pure, on pourrait imaginer un dispositif tel que l'eau s'y vaporiserait et s'y condenserait continuellement, de manière à réaliser le mouvement perpétuel, supposition jugée absurde.

Ce dispositif n'est pas autre chose qu'un osmomètre contenant la solution au dedans et l'eau pure au dehors, et placé sous une cloche. On sait que, par le jeu de la pression osmotique, la solution intérieure est soulevée dans le tube à une certaine hauteur qui mesure précisément cette pression osmotique. Cette hauteur est fixe et invariable pour une solution donnée. De telle sorte que si l'on venait à ajouter de l'eau pure dans le vase extérieur de manière à y élever le niveau, une partie de cette eau passerait dans le tube osmométrique pour relever d'autant la colonne et rétablir la constance de la dénivellation. Or, cette addition d'eau pure dans le vase extérieur que nous venons d'imaginer se produirait réellement si la tension de vapeur du liquide de l'osmomètre était plus grande que celle de l'eau pure qui l'entoure. Cette vapeur se liquéfierait, en effet, en vertu de son excès de pression. L'eau passerait alors dans l'osmomètre pour relever le niveau, et le cycle de ces mouvements se reproduirait indéfiniment.

En D est la membrane hémiperméable, en S la solution, en E l'eau pure, en H le niveau de la solution ; le tout est à la même température. Si la pression p' de la vapeur d'eau dégagée de la solution était plus grande que la tension de la vapeur p émanée de l'eau pure, à la température commune, cette vapeur se liquéfierait en vertu de son excès de pression. L'eau passerait ainsi du tube osmométrique dans le vase extérieur. Elle passerait ensuite du vase E à travers la membrane hémiperméable dans le vase S, pour venir rétablir la hauteur osmotique H.

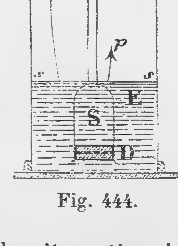


Fig. 444.

On aurait ainsi, en cycle isotherme, un mouvement perpétuel. L'appareil constituerait une machine qui travaillerait continuellement aux dépens de la seule chaleur du milieu ambiant.

Or, ceci est contraire au second principe de la thermodynamique, à savoir : *Une disposition qui permettrait à la chaleur ambiante de se transformer continuellement en travail extérieur est en contradiction avec la loi naturelle et constitue une impossibilite.*

La force élastique de la vapeur d'eau émise par la solution doit donc être plus petite que celle qui est émise par l'eau pure. Il faut qu'il y ait, et il y a, alors, un état d'*équilibre stable* entre les forces qui agissent dans l'appareil précédent.

96. Relation entre la pression osmotique et la dépression tonométrique. — Ces considérations mettent en évidence la relation qui existe entre la dépression tonométrique et la pression osmotique. Celle-ci compense celle-là. La dépression tonométrique forme, en quelque sorte, le ressort qui s'oppose au circulus perpétuel de l'eau soulevée par la force osmotique, dans l'appareil précédent. La différence des tensions de vapeur émise par l'eau pure et par la solution est la contre-partie de la pression osmotique. C'est ainsi qu'un *équilibre stable* est réalisé, au lieu du mouvement perpétuel impossible.

97. Programme de la tonométrie. — Les études tonométriques ont pour point de départ la détermination, dans les diverses circonstances, de la dépression de vapeur d'une solution, c'est-à-dire de la diminution de sa tension de vapeur par rapport à celle du liquide pur.

On aperçoit dès lors le champ ouvert à ces études et leur enchaînement. Il a fallu d'abord créer l'instrumentation et les méthodes de mesure : c'est là, en quelque sorte, un premier chapitre. En second lieu, une fois obtenus les résultats numériques, on a dû les confronter avec les conditions qui les font varier, c'est-à-dire chercher les relations qui lient la dépression de vapeur de la solution à la quantité du corps dissous, à la température de la solution, et, enfin, problème plus difficile, à la nature chimique des deux corps, le dissous et le dissolvant.

Ces trois catégories de relations s'expriment précisément par les trois lois de Babo, de Wüllner et de Raoult.

Il faudrait ensuite examiner les rapports qui existent entre les données tonométriques et les données cryoscopiques, osmotiques et autres, relatives aux solutions. Enfin, une dernière partie, l'exposé des applications, viendrait clore ce programme. Il ne saurait être question de le développer ici. Il suffira d'en indiquer les traits principaux.

98. Procédés de mesure. — A. *Méthode ébullioscopique.* — B. *Methode statique.* — C. *Autres méthodes.*

Il s'agit de déterminer la tension de vapeur d'un liquide tenant en solution un corps étranger. L'opération est la même, en principe, que s'il s'agissait d'un liquide isolé et pur. En fait, les difficultés sont accrues, pour diverses raisons, et, entre autres, par la nécessité où l'on est de maintenir constante la composition de la solution, c'est-à-dire de faire en sorte que la formation et l'élimination des vapeurs n'en modifient point la concentration.

Ces difficultés, les différents expérimentateurs ont essayé, avec plus ou moins de succès, de les résoudre. De là la multiplicité des procédés tonométriques. On peut, avec M. Raoult, les distinguer en deux groupes : les procédés dynamiques ou ébullioscopiques et les procédés statiques.

A. *Méthode ébullioscopique.* — La méthode d'ébullition consiste à faire bouillir la solution dans des conditions telles que la concentration reste invariable, à noter la température et à observer le baromètre.

La lecture du baromètre fait connaître la tension de vapeur cherchée f', puisqu'il est admis qu'à la température d'ébullition la tension de vapeur du liquide est égale à la pression atmosphérique. Ce qui n'est vrai, d'ailleurs, qu'autant que l'on s'est mis à l'abri de la surchauffe.

On a noté la température t d'ébullition de la solution. S'il s'agit d'une solution aqueuse, les tables de Regnault font connaître la tension maxima f de la vapeur émise par l'eau pure à cette même température. S'il s'agit d'un liquide pour lequel ces tables n'existent point encore, l'expérimentateur devra avoir soin de les construire lui-même, préalablement.

Pour réaliser cette méthode simple, on a imaginé des ébullioscopes divers, parmi lesquels les plus parfaits semblent être celui de Beckmann et celui de Raoult.

Ces instruments sont disposés pour éviter, en outre des erreurs de lecture du thermomètre, la *surchauffe* et les changements de concentration du liquide (1).

1° En ce qui concerne les thermomètres, ce sont des thermomètres tronqués, divisés en centièmes de degré, comprenant seulement 4 ou 5 degrés centigrades au voisinage du point d'ébullition de l'eau ou du solvant. Les lectures sont faites au cathétomètre, après chocs imprimés à la tige pour éviter l'erreur due à l'inertie de la colonne mercurielle.

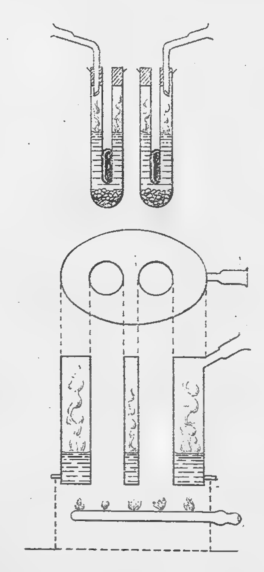


Fig. 445.

2° La cause d'erreur principale, la *surchauffe*, est écartée en appliquant le principe de Gernez : Le liquide doit être en contact, par la plus grande surface possible, avec un gaz étalé au maximum, c'est-à-dire dont le volume soit négligeable par rapport à celui de la vapeur. Cette condition a été réalisée de diverses façons : — en plongeant dans le liquide des lames de platine en rapport avec les pôles d'une pile faible, comme faisait d'abord M. Raoult ; — en chauffant la solution au moyen d'un courant de vapeur d'eau (ou du dissolvant), selon le procédé récent de M. Sakurai, emprunté à Gay-Lussac et Faraday ; ou selon le procédé Vidal-Malligand ; — ou enfin, en disposant des perles de verre en couches plus ou moins nombreuses au fond de l'ébullioscope, comme l'a fait Beckmann et, après lui, M. Raoult.

3° On se met à l'abri des changements de concentration, en réduisant au minimum la quantité de vapeur formée et en la récupérant aussitôt au moyen d'un condenseur.

L'*ébullioscope à deux moufles de M. Raoult* est composé d'une petite étuve à vapeur, de forme cylindrique, où la vapeur condensée retourne indéfiniment par reflux. Elle n'a pas d'autre rôle que de former, autour des deux éprouvettes ébullioscopiques, une sorte de matelas à température un peu inférieure à la leur, et qui les protège contre le refroidissement. Aussi, ce cylindre-étuve est-il traversé de part en part par deux cavités cylindriques juste assez larges pour recevoir les deux éprouvettes.

Ces deux éprouvettes sont pareilles. Elles sont en métal, en argent. Ce sont des cylindres de 4 à 5 centimètres de large et de 18 centimètres de hauteur. Dans le fond, une couche de perles de verre; au-dessus, la solution (aqueuse) dans l'une; le dissolvant (eau pure) dans

(1) F.-M. Raoult, *Tonométrie*, p. 13. *Scientia*, 1900.

l'autre. Le bouchon de l'éprouvette est percé de deux trous; l'un, latéral, est traversé par le tube d'un réfrigérant à reflux; l'autre, central, loge un tube à essai au fond duquel il y a un peu de mercure. Ce tube est destiné à recevoir le thermomètre de précision qui sert à mesurer la température d'ébullition.

Ces éprouvettes sont chauffées directement, par des flammes courtes et pareilles, ainsi que l'étuve. Les liquides contenus entrent en ébullition. On introduit alors le thermomètre. On lit, au millième près, la température marquée, de minute, en minute pendant dix minutes. On prend la moyenne. On connaît ainsi la température d'ébullition du solvant pur (de l'eau) et celle de la solution et, par suite, leur différence.

La méthode ébullioscopique permet de connaître la tension de vapeur de la solution comparativement à celle du liquide pur à une seule température, qui est celle d'ébullition du premier de ces liquides. Il faut, du reste, apprécier cette température à moins de deux ou trois millièmes de degré pour avoir la tension en dixièmes de millimètre. C'est là le maximum de précision que comporte la méthode.

B. *Méthode statique.* — La méthode statique consiste essentiellement à mesurer directement les dépressions produites sur la colonne mercurielle par le liquide pur et par la solution enfermés dans la chambre barométrique. C'est le principe de l'appareil classique de Dalton. Mais il a reçu des perfectionnements nombreux de la part de Wüllner, de Tammann, de Bremer, et plus récemment de M. Dieterici. Ce dernier observateur l'a ingénieusement modifié et l'a fait servir à déterminer, avec précision, la différence entre les tensions de vapeur de l'eau pure et de la solution aqueuse, à la température de la glace fondante, facile à maintenir invariable.

C. En dehors de ces deux groupes de procédés, il en a été employé quelques autres. M. Charpy s'est servi de l'hygromètre à condensation; Ostwald, Tammann et Walker ont appliqué la méthode des pesées, c'est-à-dire de l'hygromètre chimique.

99. *Limite de précision de la tonométrie.* — L'étude critique et comparative de tous ces procédés tourne, en définitive, à l'avantage de la méthode ébullioscopique, si l'on a en vue la commodité des opérations; et, au contraire, à l'avantage de la méthode statique, si l'on a en vue la précision. Mais, dans aucun cas, la sensibilité n'est suffisante pour l'étude des dissolutions étendues (1).

La méthode tonométrique ne convient donc, en définitive, qu'aux dissolutions concentrées, et elle se montre, quant à la sensibilité, inférieure aux méthodes cryoscopiques ou électriques.

Les résultats numériques varient avec les conditions de l'expérience, — c'est-à-dire avec la nature des corps, dissolvant et dissous; — avec la concentration de la solution; — avec la température où a lieu l'émission des vapeurs. L'influence de chacune de ces conditions a été examinée à part. La première qui ait attiré l'attention est celle de la température. Elle s'exprime par la loi de Babo.

(1) L'approximation dans la mesure des tensions de vapeur serait de $0^{mm},1$ par la méthode statique (nombres de Wüllner et Tammann) et de $0^{mm},15$ par la méthode ébullioscopique (Raoult.)

100. *Loi des températures (loi de Babo).* — Cette loi des températures, ou loi de Babo, — ainsi nommée en l'honneur du physicien allemand qui la fit connaître vers 1847, — considérée pendant assez longtemps comme l'expression rigoureuse de la vérité, n'est en définitive, d'après M. Raoult, qu'une approximation assez imparfaite.

Elle s'énonce ainsi :

La diminution de tension de vapeur est, à toutes les températures, la même fraction de la tension de vapeur émise par le liquide pur.

Nous avons dit que Gay-Lussac, opérant sur une solution de sel marin de densité = 1,096, avait remarqué que la tension de la vapeur d'eau émise était égale aux 9/10es de celle de l'eau pure. On a dû se demander, tout aussitôt, si en comparant les deux liquides, solution et eau pure à une autre température, le résultat serait identique. Un physicien, Prinsep, déclara qu'il l'était en effet : c'est-à-dire qu'à toute température, comme à 100°, la tension de vapeur de la solution de Gay-Lussac restait égale aux 9/10es de la tension de l'eau pure. Le sel, dans les proportions où il était employé, produisait donc une dépression constante de 1/10e. Mais c'est von Babo qui appuya cette assertion de recherches précises et la généralisa. D'après cela, la dépression relative produite par le corps dissous est indépendante de la température. Elle est constante à toute température, pour la même solution.

Soit f la tension de vapeur de l'eau pure ; $f' < f$ la tension, à même température, de la solution considérée ; $f-f'$ sera la *diminution de tension*, ou la *dépression de vapeur* ; *dépression absolue*, pour la solution considérée. Elle sera la même fraction de la tension de vapeur f.

On aura $\frac{f-f'}{f}$ = constante c, quelle que soit la température (constante < 1).

$\frac{f-f'}{f}$ est la *dépression relative*, la dépression pour l'unité de tension initiale ou, encore, l'*abaissement relatif de tension de vapeur*.

De la relation $\frac{f-f'}{f} = c$, on déduit $\frac{f'}{f} = 1-c$, ce que l'on peut traduire ainsi :

L'abaissement relatif de tension de vapeur d'une solution $\frac{f-f'}{f}$ *et, par conséquent, le rapport des tensions de la dissolution et du dissolvant pur* $\frac{f'}{f}$ *est indépendant de la température.*

Les premières déterminations numériques vérifiaient assez exactement cette relation. On la considéra donc comme rigoureuse. M. Raoult, lui-même, opérant avec l'éther comme dissolvant de diverses substances, la trouva justifiée : la dépression était constante à 1/200e près. C'était là une concordance très satisfaisante. Les écarts semblaient être de l'ordre des erreurs expérimentales.

Cependant, en y regardant de plus près, — dans d'autres cas, — par exemple pour les dissolutions de l'azotate de chaux dans l'alcool, de la

diphénylamine dans la benzine, de l'acide benzoïque dans l'acide acétique, on vit que la *dépression croissait régulièrement et systématiquement avec la température.* Des considérations théoriques, tirées de la thermodynamique, montrent qu'en effet cette dépression doit s'accroître lentement avec la température. Il faut donc, avec M. Raoult, considérer la loi des températures comme une loi empirique, assez approchée cependant, pour conserver une valeur pratique.

101. Loi des concentrations (Wüllner). — L'influence de la concentration de la solution s'exprime par la loi de Wüllner. Il n'y a pas de doute que la quantité de matière, de sel par exemple, en dissolution dans l'eau, ait une influence très marquée sur l'émission de vapeur. Plus la quantité du corps étranger augmente, plus le point d'ébullition s'élève; et plus aussi la tension de vapeur, émise dans les mêmes circonstances de température, s'abaisse. Les plus simples observations avaient montré le fait. Mais lorsqu'il s'agit de préciser la nature exacte de la relation entre la dépression et la concentration, il fallut des déterminations rigoureuses. C'est le physicien allemand Wüllner qui les exécuta, de 1858 à 1860. Il établit que cette relation consistait en une exacte proportionnalité.

La loi à laquelle ont conduit ces mesures peut donc s'énoncer ainsi :

Loi de Wüllner. — *La dépression de la vapeur croît, à une température donnée, proportionnellement à la quantité de substance dissoute dans le même poids de solution.*

Si la quantité de substance dissoute dans l'eau augmente, le point d'ébullition s'élève de plus en plus, la tension de vapeur f', prise toujours à la même température T, diminue de plus en plus : $f-f'$ augmente donc et, f ne changeant pas, la dépression relative $\frac{f-f'}{f}$ augmente aussi. La loi exprime que cette augmentation est proportionnelle à la concentration. Soit c la concentration, c'est-à-dire le nombre de grammes du corps dissous dans 100 grammes d'eau, on aura

$$\frac{f-f'}{f.c} = \text{constante K.}$$

La constante K représente la dépression relative de la tension de vapeur pour 1 gramme de matière dissoute dans 100 du dissolvant. Si, en effet, nous faisons $c=1$ dans la relation précédente, il vient $\frac{f-f'}{f} = \text{K}$.

La formule

$$\frac{f-f'}{f \times c} = \text{K}. \qquad \text{(XIV)}$$

résume les deux lois précédentes.

Ces deux lois et par conséquent la formule (XIV) s'appliquent aux *diverses solutions d'un même corps dans un même dissolvant* lorsque varient la concentration et la température, en supposant rigoureuses les lois de Babo et de Wüllner.

Celle-ci exige des conditions essentielles. La première est que l'on ait en vue des solutions suffisamment étendues. Avec des solutions trop concentrées, elle ne se vérifie pas : elle présente des écarts que Raoult a mis en évidence.

Il a vu, par exemple, en étudiant la térébenthine dissoute dans l'éther, que le rapport $\frac{f-f'}{f \times c}$ reste assez constant si les dissolutions sont étendues ; mais, dès qu'elles ont atteint une certaine concentration, supérieure à 50 p. 100, le rapport diminue rapidement et tombe enfin à la vingt-cinquième partie de sa valeur initiale, ou au-dessous.

C'est une autre loi, un peu plus compliquée, qui convient à embrasser la généralité des cas. Cette loi se simplifie dans le cas des solutions étendues : c'est cette formule particulière et simplifiée que Wüllner a fait connaître.

Cette loi des concentrations de Wüllner, qui a trouvé une vérification apparente dans les cas des solutions des sels dans l'eau, n'est pas vraie même de toutes les solutions salines ; elle souffre donc, dès le début, une première restriction. Elle n'est point valable pour les solutions concentrées. Elle est en tonométrie ce que la loi de Blagden est en cryoscopie. On peut s'en rendre compte logiquement dès que l'on réfléchit à la signification élémentaire de cette loi. Dire, en effet, que la dépression de vapeur varie proportionnellement à la concentration, cela revient à dire que, si l'on fait croître la quantité du corps dissous, en l'introduisant par portions égales et successives dans le liquide, chacune de ces portions nouvelles produira son effet propre de dépression, comme si les précédentes n'existaient pas. Chaque molécule nouvelle du corps soluble, dans ses rapports avec le dissolvant, ne devra pas être gênée par les précédentes ni empiéter sur elles. Cette condition est évidemment réalisée si le nombre final des molécules introduites dans le dissolvant est très petit par rapport à la masse de celui-ci, c'est-à-dire si la solution reste très étendue. Elle le sera moins aisément, et seulement sous des conditions particulières, si la solution est moyennement concentrée. Avec des solutions très concentrées, elle ne peut pas l'être.

C'est donc à l'expérience seule à décider des cas où la loi en question est applicable et des cas où elle ne l'est pas. Le point essentiel est d'être prévenu qu'elle est habituellement en échec pour les solutions riches en substance dissoute. Il faut, par suite, chercher une autre règle qui soit plus universelle et qui embrasse tous les cas. C'est à quoi M. Raoult paraît être arrivé, en substituant à la formule de Wüllner une formule plus large. L'introduction de la notion moléculaire a permis cette correction d'une manière simple ; mais, en outre, elle a eu encore une autre conséquence, plus importante.

102. ***Concentrations moléculaires de Raoult*** (*1887*). — Les lois précédentes permettaient de comparer, au point de vue tonométrique (au moins lorsqu'il s'agit de solutions étendues), les divers états d'une solution de même nature dans le cas où varient la température et la concentration. — Elles ne permettaient pas de comparer les solutions de nature différente.

Le rapport qui pouvait exister entre les dépressions produites par différentes substances avait échappé aux premiers expérimentateurs. C'est Raoult qui l'a aperçu. Les nombres de Babo et Wüllner pouvaient former les éléments d'un tableau plus ou moins instructif. A la vérité, pour une même substance, à concentrations et températures diverses, le rapport des valeurs numériques prenait, de par les lois précédentes, une signification simple. Mais, quand on passait d'une substance à une autre, il n'y avait plus de relation, plus de lien entre ces grandeurs.

La considération des effets moléculaires a permis d'apercevoir cette relation. Raoult, en introduisant la notion de *concentration moléculaire* au lieu de *concentration en grammes*, a subitement éclairé la question. Il a fait pour les dépressions de vapeur ce que de Vries a fait pour les pressions osmotiques. Le résultat de cette modification dans la manière de supputer les concentrations a été de faire apparaître cette loi importante, à savoir que *l'action exercée par la substance dissoute sur la tension de vapeur du dissolvant est une fonction moléculaire.* Il faut ajouter qu'Ostwald, quelques années plus tôt, avait esquissé un essai analogue (1884)

La *concentration en grammes*, c, est le poids de substance dissoute dans 100 grammes du dissolvant (1). Mais le poids, qui s'évalue en grammes et fractions de gramme, peut s'estimer encore autrement, par exemple en prenant pour unité le poids moléculaire m de la substance dissoute. On a alors la *concentration moléculaire.*

Ainsi, le poids moléculaire du sucre en grammes étant 342, 1 gramme est $\frac{1}{342}$ du poids moléculaire. On pourra dire de la solution qui contient c grammes de sucre dans 100 grammes d'eau, qu'elle contient $\frac{c}{342}$ du poids moléculaire ou que sa concentration moléculaire est $\frac{c}{342}$.

La *concentration moléculaire*, c', est donc, par définition, la concentration (poids dissous dans 100 grammes) évaluée en unités et fractions du poids moléculaire. Elle s'obtient en divisant la concentration en grammes, c, par le poids moléculaire m. On a :

$$c' = \frac{c}{m} \qquad (a)$$

L'avantage de cette notation est d'introduire la considération du *nombre des molécules*. La fraction $\frac{c}{m}$ exprime, en effet, le nombre de molécules n correspondant au poids c. — Le poids m (molécule-gramme) correspond à une molécule, 1 gramme à $\frac{1}{m}$ et c grammes à $\frac{c}{m}$ molécules. On a :

$$n = \frac{c}{m} = c' \qquad (b)$$

Si pour deux solutions la *concentration moléculaire* $\frac{c}{m}$ est la même, c'est-à-dire si $\frac{c_1}{m_1} = \frac{c_2}{m_2}$, ces solutions sont *équimoléculaires*.

Il y a avantage aussi à introduire la notation moléculaire pour le dissolvant. Si l'on appelle N le nombre des molécules du dissolvant contenues dans 100 grammes de ce dissolvant (eau, par exemple) et M le poids en grammes de la molécule, c'est-à-dire le poids moléculaire de cette substance, on aura

$$100 \text{ grammes} = N \times M \qquad (c)$$

Ces très simples notions étant bien entendues, il devient facile d'interpréter les lois de Wüllner et Babo au point de vue moléculaire. En second lieu, il est possible de corriger cette dernière conformément aux enseignements de l'expérience. Et, enfin, en troisième lieu, on résout du même coup la question des rapports tonométriques qui existent entre les différentes substances qui peuvent être employées, soit comme corps dissolvants, soit comme corps dissous, puisque, comme l'avait compris Raoult, ces rapports sont précisément des fonctions moléculaires.

103. Interprétation des lois de Babo et de Wüllner au point de vue moléculaire. — Loi de Raoult et Recoura. — Les lois des températures et des concentrations s'expriment en disant que *la dépression relative de vapeur pour une solution déterminée est indépendante de la température et proportionnelle à la quantité de substance dissoute dans un poids constant du dissolvant*, ou, en d'autres termes, qu'elle est *proportionnelle au nombre des molécules dissoutes et inversement proportionnelle au nombre des molécules dissolvantes.*

Nous avons vu les restrictions que comportent ces lois, en fait.

— On peut mettre en évidence les *constantes moléculaires* dans la formule qui résume ces lois. Cette formule est

$$\frac{f-f'}{f.c} = \text{K}. \qquad \text{(XIV)}$$

où K est une constante.

Pour une solution étendue de sucre dans l'eau, par exemple, on a K = 0,012. Ce nombre correspond le mieux à la température d'ébullition, mais est sensiblement identique pour les autres. On va voir qu'il est le même pour toutes les autres solutions de substances organiques, non électrolytes.

Pour mettre en évidence les nombres de molécules, dans cette formule, il suffit d'en multiplier les deux membres par le rapport $\frac{m}{\text{M}}$ des poids moléculaires du dissous ou du dissolvant.

On a, alors,

$$\frac{f-f'}{f} \cdot \frac{m}{c} \cdot \frac{1}{\text{M}} = \text{K} . \frac{m}{\text{M}} \dots, \qquad \text{(XV)}$$

ou, en remarquant que le poids c est égal au produit du nombre des molécules qu'il contient n par le poids de l'une d'elles m, $c = m \times n$ et de même pour le dissolvant 100 grammes $= N \times M$, et introduisant ces valeurs dans (XV)

$$\frac{f-f'}{f} \cdot \frac{N}{n} = K \times 100 \times \frac{m}{M} = k \ldots \qquad \text{(XVI)}$$

Or, pour une solution de nature déterminée (ce qui est le cas des lois de Wüllner et Babo), m et M sont constantes, puisqu'il s'agit d'un même corps dissolvant et d'un même corps dissous. Le second membre est constant : pour les solutions sucrées, par exemple, sa valeur est 22,7. Il peut être désigné par k. On a $k = 100.\ K.\ \frac{m}{M}$ et la formule définitive sera

$$\frac{f-f'}{f} = k \cdot \frac{n}{N} \qquad \text{(XVII)}$$

Ce qui répond à l'énoncé, donné plus haut : la dépression relative est proportionnelle au nombre des molécules dissoutes et inversement au nombre des dissolvantes.

— On peut donner une autre forme à l'énoncé de la loi de Wüllner, en considérant les nombres des molécules dissoutes et dissolvantes.

Si n est le nombre des molécules dissoutes dans N molécules du *dissolvant*, $\frac{n}{N}$ sera le nombre de molécules dissoutes dans 1 molécule du *dissolvant*, et $100 \times \frac{n}{N}$ sera le nombre de molécules dissoutes dans 100 molécules du *dissolvant*.

Or, la formule (XVII) peut s'écrire, en mettant cette valeur en évidence

$$\frac{f-f'}{f} = \left(\frac{k}{100}\right) \cdot \frac{100n}{N} \qquad \text{(XVII } \alpha\text{)}$$

Ce qui s'exprimera ainsi :

Les diminutions relatives de tension de vapeur sont proportionnelles au nombre de molécules de substance fixe contenues dans 100 molécules de dissolvant.

La *vérification* de la loi se fait, ordinairement, en la mettant sous la forme

$$\frac{f-f'}{f} \times \frac{N}{n} = k \qquad \text{(XVII \textit{bis})}$$

et en constatant que ce produit est constant, pour les diverses concentrations.

Il faut donc mesurer $\frac{f-f'}{f}$ par les méthodes expérimentales décrites plus

haut, puis calculer $\frac{N}{n}$, et faire le produit. La valeur de $\frac{N}{n}$ se tire des éléments qui caractérisent la solution, c'est-à-dire la concentration c et les poids moléculaires du corps dissous m et du dissolvant M.

On a $c = m.n$ et 100 grammes $=$ M. N, d'où $\frac{N}{n} = \frac{100.\, m}{c.\, M}$ et alors le produit devient

$$\frac{f - f'}{f} \times \frac{m}{c} \cdot \frac{100}{M} = k \qquad \text{(XVII } ter\text{)}$$

— *Valeur de la constante k. Loi de Raoult et Recoura.* — Quelle est la signification physique de k? Il suffit pour le savoir de considérer, parmi les solutions de même nature et de concentrations différentes, celle en particulier qui contient 1 molécule du corps dissous pour 100 molécules de dissolvant.

On a alors $N = 100\, n$, et la formule (XVII *bis*) donne la dépression correspondant à ce cas particulier.

$$\frac{f - f'}{f} = \frac{k}{100}. \qquad (\alpha)$$

La constante k représente donc le centuple de la dépression de vapeur produite par la solution d'une molécule de corps fixe dans 100 molécules du dissolvant.

Raoult et Recoura ont rattaché la notion tonométrique à la notion des densités de vapeur. Ils ont constaté, à la fois par la théorie et par l'expérience, que la valeur de la constante k dans les formules précédentes — au cas où elles sont applicables, c'est-à-dire pour les solutions étendues — était égale à un rapport $\frac{d'}{d}$ de densités. C'est le rapport de la densité réelle d' de la vapeur saturée du dissolvant, mesurée à la température d'ébullition, à la densité théorique d, déduite de la formule chimique.

On a donc

$$\frac{f - f'}{f} \cdot \frac{N}{n} = k = \frac{d'}{d}. \qquad \text{(XVII } quater\text{)}$$

Or, $\frac{d'}{d}$ peut être déterminé expérimentalement, ou calculé d'après une équation bien connue de la thermodynamique.

En voici les valeurs pour un certain nombre de dissolvants :

Valeurs de $\frac{d'}{d}$:

	Valeur expérimentale.	Valeur théorique.
Eau	1,026	1,03
Alcool	1,02	1,02
Acétone	1,01	»
Éther	1,04	1,04
Benzine	1,02	1,02
Sulfure de carbone	1,01	1,03
Méthane tétrachloré	1,05	»

On remarquera que ces valeurs sont très voisines de 1.

A côté de ceux-ci, il y a d'autres dissolvants pour lesquels ce rapport s'éloigne de 1 ; par exemple :

		Valeur théorique.
Acide acétique	$\frac{d'}{d} = 1,66$	1,64
Acide formique............	$\frac{d'}{d} = 1,34$	1,55

Si l'on se reporte à la signification physique du coefficient k, donnée plus haut, par la considération de la solution contenant 1 molécule de corps fixe dans 100 molécules du dissolvant, on pourra donner de la loi de Raoult et Recoura l'expression suivante.

$$\frac{f - f'}{f} = \frac{k}{100} = \frac{\frac{d'}{d}}{100} \qquad (\beta)$$

ce qui, en langage ordinaire, s'exprimera ainsi :

Si l'on dissout une molécule de substance fixe dans 100 molécules de dissolvant, on diminue la tension de vapeur de ce dissolvant d'une fraction $\frac{f-f'}{f}$ *qui est égale à la centième partie du rapport* $\frac{d'}{d}$ *qui existe, à la température d'ébullition, entre la densité réelle du dissolvant* d' *et sa densité théorique* d.

Or, comme ce rapport, en général, est sensiblement égal à 1 (sauf les cas de l'acide acétique, de l'acide formique), il est permis de dire qu'en dissolvant 1 molécule dans 100 de dissolvant, on abaisse la tension de vapeur du dissolvant de la centième partie de sa valeur :

$$\frac{f - f'}{f} = \frac{1}{100}.$$

Exemple : En dissolvant 342 grammes de sucre (1 molécule-gramme) dans 1 800 grammes d'eau (100 molécules-grammes), c'est-à-dire 190 grammes de sucre dans 1 litre, la tension de vapeur, qui est à 100° de 760 millimètres pour l'eau pure, sera abaissée, pour cette solution, de $7^{mm},60$. Elle sera de $745^{mm},40$.

Il y a deux remarques à faire. La première, c'est que la loi de Wüllner est à la limite de son exactitude pour les solutions qui contiennent 1 molécule pour 100. C'est là que commencent les solutions dites étendues. Il en est donc de même pour l'application à ce cas de la règle Raoult et Recoura.

La seconde observation, c'est que la véritable signification de l'observation de Raoult et Recoura est qu'elle s'étend à des solutions de nature quelconque. Quel que soit le corps dissous, la constante k a la même valeur, pourvu que le dissolvant soit le même. Et cette restriction peut à son tour disparaître, puisque, à quelques exceptions près, $\frac{d'}{d}$ est le même pour les divers dissolvants et est égal à 1,01.

104. A. ***Correction de la loi de Wüllner.*** — B. ***Règle de Raoult et Recoura.*** — C. ***Résultats expérimentaux.*** — D. ***Cas où la loi de Wüllner s'applique sans modification.***

A. Correction de la loi de Wüllner.— Nous avons dit que la loi de Wüllner, sous la forme précédente, n'était pas générale. Elle ne vaut que pour les solutions étendues, c'est-à-dire, en principe, contenant moins d'une molécule-gramme par litre.

La simple inspection de la formule (XVII) montre qu'elle ne peut être générale. Si l'on y fait $n = \frac{N}{k_1}$, on aurait $f' = o$. Or, si concentrée que soit une solution, la tension de vapeur qu'elle émet ne saurait être nulle. Pour les concentrations où n serait plus grand que $\frac{N}{k_1}$, la tension de vapeur serait négative, ce qui n'a pas de sens.

M. Raoult a vu que les résultats sont mieux d'accord avec une formule un peu différente de celle-là, dans laquelle interviendrait, non pas le nombre N de molécules du dissolvant, mais le nombre total de molécules de la dissolution $N + n$. En définitive, il suffit, pour adapter la loi à tous les degrés de concentration, de substituer, dans tous les énoncés précédents, les mots *mélange* ou *dissolution* au mot *dissolvant*.

La formule empirique qui résume le mieux les résultats de l'expérience est donc la suivante :

$$\frac{f - f'}{f} = k \frac{n}{N + n} \qquad \text{(XVIII)}$$

ou

$$\frac{f - f'}{f} \cdot \frac{N + n}{n} = k. \qquad \text{(XVIII } bis\text{)}$$

k étant constant pour toutes les solutions que l'on peut faire avec le même dissolvant et le même corps soluble, c'est-à-dire pour toutes les *solutions de même nature*, quelle qu'en soit la concentration et la température, au moins dans des limites assez étendues.

La loi de Wüllner ainsi rectifiée, généralisée, étendue à toutes dissolutions concentrées ou diluées, s'énoncera donc ainsi :

La dépression relative de vapeur d'une dissolution est sensiblement proportionnelle au rapport qui existe entre le nombre des molécules dissoutes et le nombre total des molécules du mélange.

Le rapport se calcule d'ailleurs immédiatement au moyen des éléments qui fixent la composition de la solution, C la concentration, m et M les poids moléculaires. — On a (Voy. **102**, *b* et *c*) :

$$c = m \times n \ldots 100 \text{ grammes} = M \times N$$

d'où

$$\frac{n}{N + n} = \frac{c \times M}{100 . m + c \times M}.$$

B. Règle de Raoult et Recoura. — Quant à la valeur de la constante k,

soit dans la formule restreinte (XVII), soit dans la formule plus large (XVIII), elle est fixée par une observation due à Raoult et Recoura. *La constante est égale au rapport* $\frac{d'}{d}$ *qui existe entre la densité réelle de la vapeur du dissolvant d' et sa densité théorique d.* Telle est la loi ou règle de Raoult et Recoura.

$$\frac{f-f'}{f} \cdot \frac{N+n}{n} = k = \frac{d'}{d}.$$

Autre énoncé. — On peut donner une autre forme à l'énoncé de la loi de Wüllner rectifiée, en considérant le nombre de molécules dissoutes dans 100 molécules du mélange.

Si n est le nombre de molécules du corps soluble existant dans N molécules du dissolvant, c'est-à-dire dans $N + n$ du *mélange*, $\frac{n}{N+n}$ sera le nombre de molécules dissoutes dans 1 molécule *de mélange*, et $\frac{100 \times n}{N+n}$ sera le *nombre de molécules dissoutes dans 100 molécules du mélange*. Or, la formule (XVIII) peut s'écrire, en mettant cette valeur en évidence :

$$\frac{f-f'}{f} = \left(\frac{k}{100}\right) \cdot \frac{100.n}{N+n} \qquad \text{(XVIII } ter\text{)}$$

Ce qui s'exprimera ainsi :

Les diminutions relatives de tension de vapeur sont proportionnelles au nombre de molécules de substance fixe contenues dans 100 molécules de mélange.

La correction consiste donc à substituer le mot « mélange » au mot « dissolvant » de la loi ordinaire [**103**, formule (XVII)].

— Une autre forme, enfin, peut être donnée à la règle de Raoult et Recoura. Il suffit, pour cela, de considérer, parmi les solutions d'une nature déterminée, celle qui contient en particulier 1 molécule de corps dissous dans 100 molécules de mélange. Alors, dans la formule (XVIII *bis*) $n = 1$, $N + n = 100$, et l'on a

$$\frac{f-f'}{f} = \frac{k}{100} \quad \text{ou} \quad \frac{\frac{d'}{d}}{100}.$$

La règle de Raoult et Recoura, dans ce cas, s'exprime ainsi :

Si l'on dissout une molécule de substance dans 100 de mélange (c'est-à-dire dans 99 de dissolvant), on diminue la tension de vapeur de ce dissolvant d'une fraction $\frac{(f-f')}{f}$ *qui est la centième partie du rapport qui existe entre la densité réelle d' de la vapeur du dissolvant et sa densité théorique d.*

Nous verrons tout à l'heure la valeur véritable de ces lois. Elle vient de ce qu'elles s'appliquent quel que soit le corps dissous et aussi, entre certaines

limites, sous certaines réserves, quel que soit le corps dissolvant. Nous le répétons, jusqu'à M. Raoult les relations tonométriques n'étaient envisagées que pour des solutions de même nature ne différant que par la concentration. L'introduction de la notion moléculaire par M. Raoult a permis de voir que les lois étaient indépendantes de la nature de la solution. (Voy. plus bas, n° **105**).

C. Résultats expérimentaux, tableaux. —Nous donnons ici quelques résultats expérimentaux.

1. *Solutions de sucre dans l'eau.*

I. c. Poids de sucre dissous dans 100 grammes d'eau.	II. $\frac{f-f'}{f}$ Dépression relative mesurée expérimentalement.	III. t. Température à laquelle est mesurée la dépression.	IV. Nom de l'auteur de la mesure.	V. Valeur calculée du rapport $\frac{N+n}{n}$.	VI. k. Produit $\frac{f-f'}{f}\times\frac{N+n}{n}=k$.
34gr,617.....	0,0197	0°	Dieterici..	55,886	1,10
34gr,565.....	0,021	100°	Wüllner..	55,980	1,17
17gr,076.....	0,0189	0°	Dieterici..	112,00	1,11

Le rapport $\frac{N+n}{n}$ se calcule en se rappelant que $m \times n = c$ et que 100 grammes $=$ M.N.
m poids moléculaire du sucre $= 342$.
M poids moléculaire de l'eau $= 18$.
$$\frac{N+n}{n} = \frac{100.\,m + c.M}{cM}.$$

II. *Solutions d'essence de térébenthine dans l'éther* (Expériences de Raoult).

I. Concentrations. Poids de térébenthine dissoute dans 100 grammes d'éther. c.	II. $\frac{f-f'}{f}$. Dépression relative fournie par l'expérience.	III. Température à laquelle on mesure la dépression.	IV. Valeur calculée du rapport $\frac{N+n}{n}$.	V. Produit $\frac{f+f'}{f}\times\frac{N+n}{n}=k$.
gr.				
11,346.......	0,060	20°	17,25	1,03
18,512.......	9,091	»	10,73	0,97
25,70	0,119	»	8,26	0,98
55,86	0,219	»	4,29	0,93
100	0,324	»	2,80	0,91
169,3	0,438	»	2,08	0,91
278	0,559	»	1,66	0,93
536,98........	0,700	»	1,34	0,94
1187,81........	0,832	»	1,15	0,96
3284	0,918	»	1,05	0,96
			Moyenne k	$=$ 0,95

Les éléments pour le calcul de $\frac{n+N}{n} = \frac{100.m + c.M}{c.M}$ sont les suivants : m, poids moléculaire de l'essence de térébenthine, est égal à 136 ; M, poids moléculaire de l'éther, est 74. On a $\frac{d'}{d} = 1{,}01$.

On voit que le produit $\frac{f-f'}{f} \times \frac{N+n}{n}$ est, en effet, constant et que sa valeur moyenne $k=0,95$ est suffisamment proche de la valeur théorique 1,01.

III. *Solutions de naphtaline dans la benzine.*

On peut procéder de même avec une série de solutions de naphtaline ($C^{10}H^{8}=128$) dans la benzine ($C^{6}H^{6}=78$), de concentrations diverses, depuis $c=7^{gr},36$ pour 100 de benzine jusqu'à $c=2\,280$ grammes pour 100 de benzine. En déterminant expérimentalement la valeur de $\frac{f-f'}{f}$, on trouvera une série de valeurs allant de 0,439 à 0,923 ; si l'on calcule le produit $\frac{f-f'}{f} \cdot \frac{N+n}{n}$, on trouvera que ce produit est constant et égal en moyenne à $k=0,97$.

On voit, en résumé, avec quelle précision se vérifie la loi de Wüllner modifiée et la règle de Raoult et Recoura.

D. Cas où la loi de Wüllner s'applique sans modification : 1° solutions étendues ; 2° monohydrates.

1° Dans le cas des solutions étendues, les deux énoncés de la loi des concentrations, celui de Wüllner et celui de Raoult, exprimés par les deux formules (XVII) et (XVIII), se vérifient également. Ils se confondent. Il y a donc avantage à prendre la forme la plus simple.

En effet, dans une solution étendue, le nombre des molécules du corps dissous n est très petit par rapport au nombre N des molécules du dissolvant ; le rapport $\frac{N+n}{n}$ devient sensiblement égal à $\frac{N}{n}$.

2° Il y a un autre cas où la loi primitive se confond avec la loi modifiée, et est, par conséquent, exacte pour toutes les concentrations. C'est lorsque chaque molécule de substance dissoute se combine avec une molécule de dissolvant. Chaque molécule dissoute fait disparaître une molécule du dissolvant pour faire corps avec elle et constituer une nouvelle molécule composée. Il y a donc n molécules d'un nouveau composé, au lieu du corps initial. Il n'y a pas de raison pour que celui-ci se comporte autrement que le premier. Ses n molécules se trouvent en présence de $N-n$ molécules du dissolvant. En lui appliquant la loi de Wüllner modifiée, on a :

$$\frac{f-f'}{f} \cdot \frac{N-n+n}{n} = k$$

ou

$$\frac{f-f'}{f} \cdot \frac{N}{n} = k.$$

Ceci arrive, en particulier, pour les solutions aqueuses où le corps dissous forme avec l'eau un monohydrate. C'est le cas des chlorure, bromure et iodure de potassium, des sulfates de potassium et de sodium, du chlorure de rubidium,

des sulfocyanures de potassium et d'ammonium qui sont capables de cristalliser anhydres, mais qui, en solution, sont constitués probablement en monohydrates. Leurs *ions* seraient monohydratés (1).

105. Lois de Raoult. — *L'effet tonométrique ne dépend pas de la nature de la solution. — Restrictions.*

Nous avons dit (**102**) que l'introduction de la notion moléculaire permettait non seulement d'interpréter et de corriger la loi des concentrations, mais qu'elle avait fait mieux, et révélé, du même coup, l'influence tonométrique des diverses substances, employées comme corps solubles ou comme dissolvants. Cette influence se traduit par une loi éminemment simple, qu'on peut énoncer ainsi :

La dépression tonométrique est indépendante de la nature du corps dissous et de la nature du dissolvant. Elle ne dépend que du nombre de molécules de l'un et de l'autre.

La démonstration expérimentale peut, en quelque sorte, se scinder en deux parties : 1° indifférence de la nature du corps dissous ; 2° indifférence de la nature du dissolvant.

1° *Nature du corps dissous.* — En étudiant des solutions de même nature et de concentrations diverses, on a vu que la dépression relative était proportionnelle au rapport des nombres de molécules du corps dissous et du mélange. Le coefficient de proportion k est indépendant de la température, dans une certaine limite.

On a :

$$\frac{f-f'}{f} \cdot \frac{N+n}{n} = k. \qquad \text{(XVIII)}$$

Il y a à se demander ce qui arrive lorsque l'on fait varier la nature du corps dissous.

Les expériences de Raoult répondent à cette question.

Laissons de côté, un moment, les solutions aqueuses des sels qui constituent, comme l'on sait, une sorte de cas aberrant, et envisageons les solutions de substances organiques dans l'eau, ou dans un autre dissolvant, l'éther. — Raoult a étudié les dissolutions dans l'éther d'un grand nombre de corps : essence de térébenthine, nitrobenzine, etc. Le tableau suivant montre que la valeur du coefficient k est sensiblement la même pour tous.

Corps dissous dans l'éther.	Concentration. Quantité pour 100 grammes d'éther.	Dépression relative $\frac{f-f'}{f}$.	Valeur du rapport $\frac{N+n}{n}$.	Coefficient k. $\frac{f-f'}{f} \times \frac{N+n}{n} = k$
Essence de térébenthine : $C^{10}H^{26} = 136$	»	0,0885	11,17	0,99
Nitrobenzine : $C^6H^5AzO^2 = 123$.......	»	0,0554	16,66	0,92
Salicylate de méthyle : $C^8H^8O^3 = 152$.........	»	0,086	10,86	0,94

(1) Raoult, *Tonométrie*, p. 94.

Corps dissous dans l'éther.	Concentration. Quantité pour 100 grammes d'éther.	Dépression relative $\frac{f-f'}{f}$.	Valeur du rapport $\frac{N+n}{n}$.	Coefficient k. $\frac{f-f'}{f} \times \frac{N+n}{n} = k$
Azocuminate de méthyle : $C^{22}H^{26}Az^2O^4 = 382$....	»	0,026	34,36	0,89
Benzoate d'éthyle : $C^6H^{10}O^2 = 150$........	»	0,091	10,41	0,95
Acide cyanique : $CAzOH = 43$..........	»	0,041	22,12	0,91
Acide benzoïque : $C^7H^6O^2 = 122$.........	»	0,070	13,94	0,97
Aldéhyde benzoïque : $C^7H^6O^2 = 106$.........	»	0,132	7,73	1,02
Aniline : $C^6H^7Az = 93$...	»	0,081	13,05	1,06
Mercure éthyle : $C^4H^{10}Hg = 258$........	»	0,089	10,25	0,91
Chlorure antimonieux : $SbCl^3 = 228,5$.........	»	0,037	23,41	0,87
			Valeur moyenne	$k = 0,98$

c se calcule ainsi :

$$\frac{n}{N+n} \times 100 = h. \qquad c = \frac{m}{M} \cdot \frac{100\,h}{100-h}.$$

On voit que, quelle que soit la substance dissoute, le coefficient k est le même. Sa valeur moyenne est invariable et elle est extrêmement voisine de 1, ou encore du rapport $\frac{d'}{d}$ qui est 1,01.

En d'autres termes, toutes les solutions qui ont le même nombre de molécules n, réparties dans la même quantité de la solution, présentent la même dépression de vapeur, et par conséquent possèdent aussi le même point d'ébullition. Le nombre seul des molécules, et non leur qualité, intervient dans le phénomène. Toute molécule, quelle qu'elle soit, exerce, dissoute dans un dissolvant déterminé, la même dépression de vapeur.

2° *Nature du dissolvant.* — On peut aller plus loin et s'assurer que la dépression de vapeur, indépendante déjà de la nature du corps dissous, — lequel n'intervient que par le nombre de ses molécules, — est indépendante aussi de la nature du dissolvant, lequel n'intervient également que par le nombre des siennes.

C'est ce que M. Raoult a constaté en étudiant les différents dissolvants, benzine, éther, alcool, acétone, chloroforme, etc. L'effet de dépression, l'effet tonométrique est le même pour les solutions qui contiennent le même nombre de molécules dissoutes dans le même nombre total de molécules du mélange.

La loi générale de la tonométrie est donc une loi moléculaire remarquablement simple.

Si l'on détermine, en effet, pour divers dissolvants, la valeur du produit

$$\frac{f-f'}{f} \cdot \frac{N+n}{n} = k,$$

on trouve pour k des valeurs assez voisines entre elles, et voisines de l'unité. C'est ce que l'on a pu constater plus haut à propos des solutions de

matières organiques dans l'eau, où $k = 1,13$ en moyenne ; dans l'éther, où la moyenne est 0,95 ; dans la benzine, où elle est 0,97.

Restrictions. — Toutefois, il y a, en ce qui concerne l'influence de la nature du dissolvant, des irrégularités qu'il importe de signaler.

On peut diviser les dissolvants en deux groupes :

1° Ceux du premier groupe donnent des *valeurs normales* pour la dépression tonométrique ; ce sont : l'*eau*, l'*éther*, l'*alcool*, l'*acétone*, l'*acide acétique*.

2° Ceux du deuxième groupe donnent tantôt des *valeurs normales*, tantôt des *valeurs anormales*, suivant le corps qui est dissous. Ces dissolvants sont : le *sulfure de carbone*, l'*amylène*, le *bromure d'éthyle*, la *benzine*.

Les valeurs sont normales lorsque l'on y dissout des hydrocarbures simples ou substitués et des éthers : alors k est voisin de 1, et pratiquement égal à 1.

Les valeurs sont anormales (plus petites de moitié environ) lorsqu'on y dissout certains corps tels que les acides (benzoïque, valérianique, etc.), et quelques phénols : alors, k est plus petit que 1. Il est, en moyenne, égal à 0,5.

Ce résultat aberrant tient sans doute à ce que, dans ces cas, il se fait des combinaisons entre les corps en présence. Il ne s'agit plus de dissolution simple de corps conservant leur nature, mais d'action chimique, de groupement moléculaire, et probablement de gémination des molécules du corps dissous dont chaque molécule double se combinerait à une molécule du dissolvant.

106. *Dépression de vapeur dans le cas des solutions étendues. La dépression moléculaire est sensiblement égale au centième du poids moléculaire du dissolvant.* — La formule générale des lois tonométriques est la suivante :

$$\frac{f-f'}{f} \times \frac{N+n}{n} = k = \frac{d'}{d} \qquad \text{(XVIII } bis, \mathbf{106})$$

que l'on peut appeler formule de Raoult et Recoura.

Nous savons qu'en mettant en évidence la concentration de la solution et les poids moléculaires du dissous et du dissolvant (**104**, A), c'est-à-dire en remplaçant $\frac{N+n}{n}$ par sa valeur, cette formule devient

$$\frac{f-f'}{f} \cdot \frac{100m + c.M}{c.M} = k = \frac{d'}{d} \qquad \text{(XVIII } quater)$$

Dans le cas particulier des solutions étendues où $\frac{N+n}{n}$ se confond à la limite avec $\frac{N}{n}$, la loi de Wüllner s'applique sans modification ; la formule (XVII) de cette loi est

$$\frac{f-f'}{f} \times \frac{N}{n} = k = \frac{d'}{d} ;$$

ou, en remplaçant N et n par leurs valeurs,

$$\frac{f-f'}{f} \cdot \frac{m}{c} \cdot \frac{100}{M} = k = \frac{d'}{d} \qquad \text{(XVII } ter, \mathbf{103})$$

Pour l'eau et les dissolvants ordinaires, alcool, éther, benzine, sulfure de carbone, $\frac{d'}{d}$ a une valeur très voisine de 1 ; ce rapport est *pratiquement* égal à 1 et la formule devient

$$\frac{f-f'}{f} \cdot \frac{m}{c} = \frac{M}{100}. \qquad \text{(XIX)}$$

C'est cette formule, valable seulement pour les dissolutions étendues de corps non électrolytes, organiques, et pour les dissolvants où $d' = d$, qui sert à la détermination des poids moléculaires par la tonométrie. Elle exprime que *la dépression moléculaire est sensiblement égale au centième du poids moléculaire du dissolvant* (**108**).

107. *Applications de la tonométrie.* — 1° *Détermination des densités de vapeurs saturées*; 2° *Détermination des poids moléculaires*; 3° *Détermination de la pression osmotique.*

1° M. Raoult a proposé d'appliquer, en physique, la loi qu'il a découverte avec M. Recoura, à la détermination des densités de vapeurs saturées. On mesurerait, à l'ébullition, les tensions f et f' du liquide employé pur et ensuite comme dissolvant d'un corps organique quelconque, et l'on déduirait d' de la formule

$$\frac{f-f'}{f}\,\frac{N+n}{n} = k = \frac{d'}{d} \qquad (\gamma)$$

dans laquelle

$$\frac{N+n}{n} = \frac{100.m + c.M}{cM}.$$

La méthode est d'une pratique assez simple et pourrait servir à vérifier les valeurs obtenues autrement.

2° La principale application de la tonométrie est la détermination des poids moléculaires.

Il suffit, pour avoir le poids moléculaire d'un corps fixe, de le dissoudre dans un dissolvant convenable, eau, alcool, éther, acétone, acide acétique, de manière à avoir une solution étendue, de concentration faible, et cependant pas trop faible, parce qu'alors les mesures n'ont plus de précision ; soit c grammes dans 100 grammes du dissolvant. On détermine ensuite, par la tonométrie, à une température quelconque, par exemple à la température d'ébullition, les tensions f et f' du liquide pur et de la solution. On tirera le poids moléculaire de la formule précédente (XIX).

$$m = \frac{M}{100}\,\frac{c.f}{f-f'} \qquad \text{(XX)}$$

C'est la formule en usage pour la détermination des poids moléculaires par la méthode tonométrique.

Si l'on voulait opérer dans le cas général, il faudrait employer la formule complète (γ) où m serait l'inconnue.

Avec l'eau, dont le poids moléculaire $M = 18$, la formule devient

$$m = 0{,}18 \cdot \frac{c.f}{f - f'} \qquad \text{(XXI)}$$

Dans le cas de l'alcool (poids moléculaire 46), le nombre 0,18 est remplacé par 0,46. Pour les autres dissolvants, on obtient de même la constante de la formule (XX) :

Benzène (p. moléculaire = 79)........................	0,79
Éther (p. moléculaire = 74)........................	0,74
Acétone (p. moléculaire = 59)........................	0,59
Acide formique (p. moléculaire = 71)..............	0,71
Acide acétique (p. moléculaire = 97)..............	0,97

Raoult a indiqué les avantages et les inconvénients de la méthode tonométrique appliquée à la détermination des poids moléculaires. L'inconvénient principal, c'est qu'elle est moins exacte et moins générale que la méthode cryoscopique, par exemple ; l'avantage, c'est qu'elle s'applique à des cas qui échappent aux autres méthodes.

Elle a servi à déterminer les poids moléculaires de quelques sels en dissolution dans des menstrues autres que l'eau, et de plusieurs métaux en dissolution dans le mercure (Ramsay). Les lois qui régissent les tensions de vapeurs des solutions de sucre dans l'eau ou de l'azotate de chaux dans l'alcool s'appliquent parfaitement aux dissolutions dans le mercure des différents métaux, argent, magnésium, manganèse, zinc, cadmium, gallium, lithium, étain, bismuth.

3° Enfin, et c'est par là que la tonométrie se rattache à l'osmose, la dépression de vapeur d'une solution fournit une valeur de la pression osmotique (n° ***96***).

108. Loi moléculaire. La dépression moléculaire de la tension de vapeur d'une solution vraie est constante. — Parmi toutes les formes que l'on peut donner à la loi des concentrations, il y en a une qui a été utilisée par M. Raoult, non sans avantage. Elle résulte de la considération de la *dépression moléculaire* ou *diminution moléculaire de tension de vapeur* de la solution examinée.

Soit cette solution contenant c grammes de dissous dans 100 grammes de dissolvant,... f' la tension de vapeur de cette solution à la température d'ébullition, f la tension de vapeur du liquide pur à cette même température, $\frac{f-f'}{f}$ est la dépression relative, ou diminution relative de tension de vapeur, et l'on a la relation (XIV):

$$\frac{f - f'}{f.c} = k \qquad \text{ou} \qquad \frac{f - f'}{f} = kc.$$

On peut mettre en évidence la *concentration moléculaire*. Appelons n le nombre de molécules existant dans le poids c grammes du corps dissous, et m le poids de la molécule en grammes (molécule-grammes). On a

$$c = m \times n.$$

Le nombre n de molécules correspondant à c grammes est donc

$$n = \frac{c}{m} \cdot$$

La relation

$$\frac{f - f'}{f} = kc \qquad \text{devient} \qquad \frac{f - f'}{f} = km \times n \qquad \text{(XIV, 1)}$$

La relation équivalente

$$\frac{f - f'}{f \times c} = k \qquad \text{devient} \qquad \frac{f - f'}{f} \cdot \frac{m}{c} = km \qquad \text{(XIV, 2)}$$

en multipliant les deux membres par m.

D'après les lois de Wüllner et de Babo, k est constant pour les solutions d'une même substance, km l'est aussi ; désignons-le par k_1. Les relations précédentes deviennent :

$$\frac{f - f'}{f} = k_1 n ;\ldots \frac{f - f'}{f} \cdot \frac{m}{c} = k_1 \qquad \text{(XIV, 3)}$$

Or, Raoult a précisément observé qu'il en est encore de même quand on passe d'une substance dissoute à une autre ; $k_1 = km$ reste sensiblement constant et la formule (XIV, 2) est applicable à des solutions différant par le corps dissous. C'est sous cette forme que la loi de Raoult a été primitivement vérifiée (**105**, 1°). On évaluait, pour diverses substances (térébenthine, acide benzoïque, mercure-éthyle, etc.) dissoutes dans l'éther, l'expression $\frac{f - f'}{f} \cdot \frac{m}{c}$ et l'on constatait qu'elle était sensiblement constante (égale en moyenne à 0,0098).

La signification de cette expression est simple. Elle représente la *dépression moléculaire* de la substance dissoute. — C'est la dépression relative qui correspondrait à une molécule de substance dissoute dans 100 grammes de dissolvant. En effet, si l'on fait $m = c$, c'est-à-dire si l'on considère la solution qui contient le poids moléculaire m grammes dans 100 de dissolvant, l'expression précédente devient $\frac{f - f'}{f}$, c'est-à-dire la dépression relative à cette solution. La formule (XIV, 2) s'énoncera donc : *La dépression moleculaire est sensiblement la même pour les différentes substances fixes, organiques.*

La formule (XIX, ***106***) rapprochée de (XIV, 3) montre que k_1 ou km est pratiquement égal à $\frac{}{100}$ (au moins dans le cas de solutions étendues de substances organiques non électrolytes) — et par conséquent que *la dépression moléculaire est sensiblement égale au centième du poids moléculaire du dissolvant* (***106***). La différence peut être de 1/5. Par exemple, pour l'éther, nous trouvons 0,0098 au lieu de 0,0074.

109. Élévation Γ ***du point d'ébullition. L'élévation moléculaire est la même pour le même dissolvant.*** — Nous avons dit que l'influence du corps dissous se traduisait par l'*élévation du point d'ébullition sous la même pression*, ou, ce qui revient au même, par la *diminution de tension de vapeur à la même température* (***94***).

Cette diminution de tension de vapeur (dépression), on la mesure directement (méthode statique, ***98***), ou on la déduit de la détermination du point d'ébullition de la solution, par le moyen des tables (méthode ébullioscopique, ***98***).

On peut faire autrement, et envisager directement les *élévations des points d'ébullition.*

La pression extérieure étant supposée fixe, l'élévation du point d'ébullition d'une solution dépendra, pour un même corps fixe dans le même solvant, de la concentration; en second lieu, elle dépendra de la nature du corps dissous. Il y a là des relations de dépendance analogues aux lois de Wüllner et de Raoult, et qui pourraient s'en déduire rationnellement. Il faudrait connaître, pour cela, la manière dont la tension de la vapeur du dissolvant f varie avec la température. On sait bien que la tension de vapeur f augmente avec la température T ; mais on ne connaît pas la nature exacte de cette fonction (***94***, note 2°). On l'a déterminée empiriquement pour la vapeur d'eau (tables de Regnault) et pour quelques autres vapeurs.

Soit $f = \varphi(\mathrm{T})$ cette fonction. On en pourrait prendre la différentielle par rapport à T, soit $\frac{df}{d\mathrm{T}}$. On aurait, à la limite, et par définition même,

$$\frac{f-f'}{\mathrm{T}'-\mathrm{T}} = \frac{df}{d\mathrm{T}},$$

c'est-à-dire la relation entre la dépression de vapeur $(f-f')$ et l'élévation correspondante de la température $\mathrm{T}'-\mathrm{T}$. Or, $\mathrm{T}'-\mathrm{T}$ sera l'élévation de la température d'ébullition, si la pression extérieure est convenablement choisie, si elle est f ou f'. En appelant Γ cette élévation du point d'ébullition, on aura donc

$$\frac{f-f'}{\Gamma} = \frac{df}{d\mathrm{T}} \qquad \text{(XXII)}$$

d'où

$$\frac{f-f'}{f} = \Gamma \cdot \frac{df}{dt} \cdot \frac{1}{f}$$

à la condition que la dépression soit faible et que l'élévation du point d'ébullition soit faible aussi, conditions qui seront réalisées s'il s'agit d'une solution étendue.

Substituant dans la formule (XIV, 3) qui exprime les lois de Wüllner et Raoult

$$\frac{f-f'}{f} \cdot \frac{m}{c} = k_1, \qquad \text{il vient} \qquad \Gamma . \frac{m}{c} = k_1 \frac{f}{\frac{df}{dT}}$$

et, s'il s'agit de l'ébullition à la pression normale, $f = 760$. On pourra considérer le second membre comme constant, et l'on aura

$$\Gamma . \frac{m}{c} = Q \qquad \text{(XXIII)}$$

Q étant une constante. Cette formule (XXIII) s'applique au cas où l'élévation du point d'ébullition est faible (égale ou inférieure à 1°) et où l'ébullition se produit à la pression atmosphérique.

Or, Γm représente l'*élévation moléculaire* du point d'ébullition, c'est-à-dire l'élévation du point d'ébullition pour la solution qui contiendrait le poids c grammes $= m$ (poids moléculaire) dissous dans 100 grammes. En faisant $c = m$, l'expression se réduit, en effet, à

$$\Gamma = Q.$$

La loi de Raoult et Wüllner, transposée pour les points d'ébullition, s'énoncera donc ainsi :

L'élévation moléculaire du point d'ébullition est la même pour toutes les solutions étendues de substance organique (non électrolyte) faites dans un même dissolvant.

Autrement dit, si l'on dissout 1 molécule ou le même nombre de molécules dans le même poids de dissolvant, toutes ces solutions équimoléculaires auront le même point d'ébullition.

Valeurs de Q. — L'expérience a fourni les valeurs de Q, c'est-à-dire de l'élévation du point d'ébullition. Si l'on dissout 1 molécule-gramme d'un corps fixe, dans les différents solvants, l'élévation Q sera :

Dissolvants.	Degrés.
Eau	5,2
Alcool	11,5
Éther	21,5
Acétone	16,7
Benzine	26,7
Acide acétique	31,3
Acide formique	23,7

— S. Arrhénius a donné une autre forme à cette loi. Il l'a traduite par une formule obtenue en exprimant, selon les principes de la thermodynamique, la loi de Raoult,

$$\Gamma . \frac{m}{c} = 0{,}01988 \frac{T^2}{L_2} \qquad \text{(XXIV)}$$

valable pour les solutions étendues, où L_2 représente, en petites calories, la chaleur latente de vaporisation du dissolvant, et T sa température d'ébullition absolue, en degrés centigrades. La signification en est intéressante : *L'élévation moléculaire du point d'ébullition d'une dissolution étendue d'un corps fixe (non électrolyte) est directement proportionnelle au carré de la température absolue d'ébullition, et inversement proportionnelle à la chaleur latente de vaporisation du dissolvant.*

— *Détermination des poids moléculaires.* — On peut appliquer la formule (XXIII) à la détermination des poids moléculaires.

On en tire

$$m = Q \cdot \frac{c}{\Delta T} \cdot$$

On mesure Δ directement, c'est-à-dire l'élévation du point d'ébullition aux environs de la pression normale (760 millimètres) pour une solution contenant c grammes du corps fixe dissous dans 100 grammes d'un dissolvant approprié. Les valeurs de Q viennent d'être indiquées pour les divers dissolvants. On peut donc connaître le poids moléculaire m. Beckmann (1890) a appliqué cette méthode. Il en a obtenu des résultats assez satisfaisants. Les valeurs sont approchées à 5 p. 100.

110. Relation entre l'élévation du point d'ébullition Γ, **et l'abaissement du point de congélation d'une solution**, Δ. — On a dit (**92**) que la séparation d'un corps dissous d'avec le dissolvant peut être réalisée de diverses manières : par l'osmose, par l'évaporation, par la congélation, par la dissolution d'un autre corps qui enlèvera le dissolvant. C'est un même travail qui est exécuté par des agents différents. En évaluant ces travaux, dans chaque cas, au moyen des éléments physiques correspondants, tension de vapeur, chaleur de fusion, chaleur de vaporisation, pression osmotique, température d'ébullition, température de congélation, — et en écrivant que ces travaux sont égaux pour la même quantité de dissolvant séparée de la même quantité du corps dissous, on aura une relation entre ces diverses grandeurs.

Appliquons ceci à une solution (aqueuse) considérée à son point de congélation et imaginons qu'on enlève à la solution 1 gramme d'eau à l'état de glace. Si Δ est l'abaissement du point de congélation et L la chaleur latente de fusion, le produit ΔL représentera la quantité de chaleur consommée par le travail de séparation; de même, si Γ est l'élévation du point de vaporisation, dans les mêmes conditions, et L_2 la chaleur de vaporisation, le produit ΓL_2 représentera le même travail, et on aura :

$$\Gamma L_2 = \Delta L \qquad \text{(XXV)}$$

C'est-à-dire :

Pour les dissolutions étendues de même nature, et à la température de congélation, l'abaissement Δ du point de congélation et l'élévation Γ du point d'ébullition sont en raison inverse des chaleurs latentes L_1 et L_2 correspondant à ces deux changements d'état.

111. Relation entre la dépression relative de vapeur et l'abaissement Δ du point de congélation d'une solution. — La relation entre la dépression de vapeur et l'abaissement du point de congélation s'obtient en recourant aux considérations de la thermodynamique. Nous devons nous contenter de dire ici que l'équation de Clausius-Clapeyron peut être amenée à la forme suivante :

$$\frac{d'}{d} = \frac{T^2}{L_2 \times M \times f} \cdot \frac{df}{dT} \times 1{,}988$$

où d est la densité théorique de la vapeur, d' la densité réelle à la température absolue T, M le poids moléculaire du dissolvant, L_2 sa chaleur latente de vaporisation en petites calories, f la tension de vapeur du dissolvant pur à T.

Cette formule devient, dans le cas des solutions étendues :

$$\frac{d'}{d} = 1{,}988 . \frac{T^2}{L_1 \times m} \times \frac{f - f'}{f . \Delta} \qquad \text{(XXVI)}$$

où m est le poids moléculaire du corps dissous, L_1 sa chaleur latente de fusion, Δ l'abaissement du point de congélation de la solution. C'est, comme on le voit, la relation cherchée entre la dépression relative $\frac{f - f'}{f}$ et l'abaissement Δ du point de congélation (1).

Cette relation comprend, comme cas particulier, dans l'hypothèse des solutions aqueuses, celle qui a été proposée par Guldberg et Kolacek, à savoir :

$$\frac{\Delta . f}{f - f'} = 105. \qquad \text{(XXVII)}$$

b. Pseudo-dissolutions. Solutions salines.

Les lois tonométriques sont vraies de toutes les solutions, sauf d'une catégorie. Cette catégorie, à la vérité très nombreuse, comprend les solutions aqueuses des sels, acides forts, bases fortes, conductrices de l'électricité.

Ces solutions ont, en effet, une constitution spéciale. Il n'y a pas seulement dissolution de la matière fixe dans l'eau. Il y a en outre un phénomène de décomposition du corps dissous qui se dissocie en ses éléments ; et ce fait se complique souvent encore d'une action inverse, d'une combinaison de la matière avec l'eau (formation d'hydrates).

Il ne faudra donc pas s'étonner que ces solutions communes échappent aux lois tonométriques propres aux dissolutions véritables, c'est-à-dire à celles où la matière dissoute ne fait que se diffuser dans le dissolvant sans changer de nature. Ce n'est pas en étudiant les solutions salines que l'on pouvait découvrir les plus importantes de ces lois, et qu'on les a découvertes en effet.

(1) F.-M. Raoult, *Tonométrie*, p. 26-34 ; *Scientia*, 1900.

— Il s'agit de voir de quelle manière et avec quelles modifications ces lois peuvent être appliquées aux solutions salines et quels renseignements précieux en résultent pour l'intelligence de la constitution de ces pseudo-solutions.

112. Anomalies des pseudo-solutions. — Courbes des dépressions moléculaires. — Pour les solutions vraies, la formule de Raoult et Recoura,

$$\frac{f}{f-f'}\,\frac{N+n}{n}=k=\frac{d'}{d} \qquad \text{(XVIII } bis, \textbf{106})$$

qui résume les lois tonométriques, est générale et s'applique quelles que soient les substances considérées, dissoute et dissolvante. S'il s'agit du cas normal, alors k est voisin de 1. Il est pratiquement égal à 1. Par exemple, pour les solutions aqueuses de substances organiques, non électrolytes, $\frac{d'}{d}=k=1$ si on considère ces solutions à 0°; et $\frac{d'}{d}=k=1{,}03$, si on les considère, comme on le fait ordinairement, à la température de 100°.

La formule précédente se simplifie si l'on remplace les symboles par leur valeur : M poids moléculaire de l'eau = 18 grammes, et comme 100 grammes = M × N,... le nombre des molécules N est égal à 5,55 ; $\frac{d'}{d}=1{,}03$.

On a alors

$$\frac{f-f'}{f.n}=\frac{1{,}03}{5{,}55+n} \qquad (\alpha)$$

ou

$$\frac{f-f'}{f}\,\frac{m}{c}=k\,.\,\frac{M}{100}=1{,}03\,\frac{18}{100}=0{,}185.$$

Le premier membre de l'une et l'autre formule représente la *dépression moléculaire* de la solution (***108***). La première de ces formules (α) se prête bien à l'étude de l'influence de la concentration.

Si l'on part d'une solution infiniment étendue, $n=0$, la dépression moléculaire est égale à 0,185. Elle diminue régulièrement à mesure que n augmente. On peut tracer la courbe des dépressions moléculaires en prenant celles-ci pour ordonnées, tandis que les abscisses seront les nombres n de molécules dissoutes. Cette courbe est très tendue ; elle est légèrement convexe vers l'axe des abscisses. Elle coupe l'axe des ordonnées à la distance 0,185. Elle se confond pratiquement avec une droite jusqu'à une certaine concentration, par exemple, jusqu'à $n=0{,}2$. (Cette valeur correspond à la solution contenant 0,2 du poids moléculaire pour 100 grammes d'eau, si la solubilité du corps permet d'obtenir cette concentration.)

— Pour les pseudo-solutions des sels, acides forts, bases fortes, il n'en est plus de même. Les lois ne s'appliquent plus que partiellement. La formule

$$\frac{f-f'}{f}\cdot\frac{N+n}{n}=k$$

ne convient qu'à la condition de considérer k comme une quantité variable. Au lieu d'être voisine de 1, cette quantité est plus grande. Elle peut monter jusqu'à 2 et 3.

C'est une première différence. Une autre consiste dans la manière dont se traduit l'influence de la concentration. La courbe des dépressions moléculaires ne se comporte pas de même (Voy. n° ***119***).

Ces deux infractions aux lois tonométriques doivent être examinées séparément, d'abord au point de vue expérimental, puis au point de vue de la théorie. Il faut, en premier lieu, les caractériser en fait ; ensuite, il faudra montrer comment, par une hypothèse simple, on peut les faire rentrer dans les lois générales, convenablement entendues.

113. *Première anomalie : Majoration de la dépression relative de vapeur. — Exception : Anomalie par défaut.* — La première dérogation est l'anomalie par excès de la dépression de vapeur.

La dépression relative $\frac{f-f'}{f}$, qui est égale à $\frac{d'}{d}.\frac{n}{N+n}$ ou $k.\frac{n}{N+n}$, prend une expression plus simple dans le cas des solutions étendues, à savoir :

$$\frac{f-f'}{f.n} \text{ ou } \frac{f-f'}{f}.\frac{m}{c}=\frac{d'}{d}.\frac{M}{100}=k.\frac{M}{100},$$

où le premier membre exprime la *dépression moléculaire* (**107**). Dans le cas des solutions aqueuses normales étendues, examinées à 100°, on a :

$$k=\frac{d'}{d}=1{,}03\left(\text{on aurait } k=\frac{d'}{d}=1 \text{ si l'on opérait à } 0°\right);$$

M poids moléculaire de l'eau $=18$ et le second membre, en définitive, devient $1{,}03\times0{,}18=0{,}185$.

La dépression moléculaire normale à la température de 100° est 0,185, pour les solutions aqueuses. Dans ce cas, la constante k est égale à 1,03.

Voilà le cas des solutions normales véritables.

Pour les solutions salines, qui sont des pseudo-solutions, il en est autrement. On trouve des nombres différents, en général supérieurs, — inférieurs dans un cas.

Voici des exemples appartenant à diverses catégories :

Première catégorie. — Sels MA. — Chlorure, bromure, iodure de potassium, de rubidium, etc.

L'expérience montre que pour les solutions de KCl, de concentration variant de $n=0{,}1$ à $n=0{,}4$ molécule de sel pour 100 grammes d'eau, on a $\frac{f-f'}{f.n}=0{,}34$ au lieu de 0,185. — La constante $k=1{,}88$ au lieu de 1,03.

Pour le bromure de potassium on aurait......	0,32 et $k=1{,}77$
Pour KI......................................	0,35 et $k=1{,}94$
Pour RbCl....................................	0,32 et $k=1{,}77$

Deuxième catégorie (M^2A). — Chromate de potasse K^2CrO^4.

L'expérience donne, de $n=0{,}1$ jusqu'à $n=0{,}3$ p. 100 d'eau, une dépression moléculaire $=0{,}39$, $k=2{,}16$.

Troisième catégorie (MA^2). — Azotate de baryte $Ba(AzO^3)^2$. Pour $n=0{,}1$, la dépression moléculaire $=0{,}35$, $k=1{,}94$.

Azotate de magnésie $Mg(AzO^3)^2$. Pour $n = 0,1$, la dépression moléculaire $= 0,40$, $k = 2,22$.

Quatrième catégorie (M^2A^2). — Sulfate de magnésie $MgSO^4$: dépression moléculaire $= 0,13$, $k = 0,72$.

Il y a donc majoration dans la plupart des cas, mais il y a une exception bien remarquable à cette règle. Le sulfate de magnésie produit une anomalie par défaut : k est plus petit que 1. La dépression moléculaire est inférieure à la dépression normale.

114. Explication de l'anomalie par excès : Coefficient de correction. — Hypothèse de la dissociation en ions. — Valeur dépressive égale de tous les ions et de toutes les molécules. — On vient de voir, dans les exemples précédents, que la valeur de k de la formule générale est majorée le plus souvent. Au lieu d'être égale à 1,03, elle est 1,88 ; 1,77 ; 1,94 ; 2,16 ; 2,22.

La dépression réelle produite par la molécule de sel est plus grande que la dépression produite par la molécule normale.

Pour le chlorure de potassium, elle est égale à la dépression normale multipliée par un coefficient $i = 1,83$. On a, en effet, $0,34 = 0,185 \times 1,83$.

Pour KI, on a $0,35 = 0,185 \times 1,88$; $i = 1,88$.

En un mot, la dépression réelle produite par la molécule de sel dissoute dans 100 grammes d'eau est égale à la dépression théorique multipliée par un *coefficient de correction i*, presque toujours supérieur à l'unité. Pour le chlorure de potassium, $i = 1,83$; pour l'iodure de potassium, $i = 1,88$; pour le chromate de potasse, $i = 2,10$; pour l'azotate de magnésie, $i = 2,16$, etc. *Le coefficient de correction, est par définition, le rapport de la dépression moléculaire réelle à la dépression théorique.*

Ce fait ne comporte que deux explications : ou bien, réellement la molécule de l'électrolyte, au lieu d'avoir sur la tension de vapeur une action dépressive constante, indépendante de la nature du corps dissous, comme cela a lieu pour tous les autres corps, a, au contraire, une action variable, spécifique, et toujours majorée ; ou bien, le nombre des particules dissoutes est plus grand qu'il ne paraît et le corps dissous est en état de dissociation.

Telles sont les deux alternatives.

C'est la seconde qui est, de beaucoup, la plus vraisemblable. En admettant la dissociation des solutions salines, on rend compte de la majoration observée. Le pouvoir dépressif reste attaché à la particule duc orps ; la généralité de la loi reste sauve.

Il est plus simple et plus scientifique d'admettre une dissociation du corps dissous, que de supposer qu'une loi si générale, assignant à la molécule dissoute, quelle qu'elle soit, une action dépressive déterminée, cesserait d'être vraie pour les solutions des sels de bases fortes et d'acides forts. Hypothèse pour hypothèse, c'est la première qui a la vraisemblance ; elle a été admise par Raoult, S. Arrhénius, et, en général, les physico-chimistes.

On accepte donc l'idée que les substances électrolytes sont dissociées, dans

leurs prétendues solutions. Elles sont dissociées en molécules électrolytiques; en radicaux électro-positifs et radicaux électro-négatifs, comme l'on disait autrefois, — en *ions* comme l'on dit aujourd'hui. Ce n'est pas le moment d'examiner les propriétés que l'on est obligé d'attribuer à ces *ions*. Il suffit, ici, d'une seule. Il suffit d'admettre que chaque molécule exerce la même influence sur la formation de vapeur du dissolvant. Qu'elle soit chimique ou électrolytique, chacune déprime la tension de vapeur de la même quantité. Il ne s'agira plus que d'en régler le nombre, pour chaque solution déterminée, c'est-à-dire de fixer le degré de dissociation, de manière à rendre compte de la valeur numérique observée.

L'hypothèse d'une dissociation possible explique le fait de la majoration : en fixant convenablement le degré, on expliquera la valeur numérique de cette majoration, dans chaque cas particulier.

Voyons quels seront ces *degrés de dissociation* ou d'*ionisation*.

Première catégorie. — Prenons le chlorure de potassium KCl. La molécule sera dissociée en ion électro-positif K ou *anion*, et ion électro-négatif ou *kathion* Cl. Si nous prenons la solution dont il a été question tout à l'heure contenant 0,1 molécule de KCl pour 100 grammes d'eau, demandons-nous combien de molécules KCl auront dû subir la décomposition pour que la dépression soit 0,34 au lieu d'être 0,185. — On trouve 0,83; ce qui veut dire que, dans une solution de cette concentration, il devra y avoir 83 molécules sur 100 dissociées en ions.

Voici comment peut se faire l'évaluation :

Soit n le nombre de molécules de KCl dissoutes dans 100 grammes d'eau. Supposons qu'il y ait sur ces n molécules a molécules ionisées, c'est-à-dire remplacées par 2 molécules K et Cl. Le nombre total des molécules actives sera donc :

$$\nu = (n - a) \text{ entières} + 2a \text{ ions} = n + a.$$

C'est à ce nombre total que, par hypothèse, sera applicable la loi de la dépression moléculaire. On aura donc

$$\frac{f - f'}{f.\nu} = 0{,}185.$$

D'autre part, d'après l'expérience, on a en réalité

$$\frac{f - f'}{f.n} = 0{,}34$$

d'où, divisant,

$$\frac{\nu}{n} = \frac{0{,}34}{0{,}185} = \frac{183}{100}, \text{ ou } \frac{n + a}{n} = \frac{183}{100} = i, \text{ par définition du coefficient de correction,}$$

d'où

$$\frac{a}{n} = \frac{83}{100}.$$

Ce qui signifie que sur un nombre n de molécules égal à 100, il y en aurait $a = 83$ de dissociées. Le rapport $\frac{a}{n}$ du nombre des molécules ayant subi la dissociation au nombre total primitif des molécules est ce que l'on nomme le *degré de dissociation* (86).

En admettant donc que, dans la solution considérée (n molécules de KCl dans 100 grammes d'eau) il y ait 83 molécules ionisées sur 100, et que chacune suive la loi de dépression moléculaire, c'est-à-dire agisse de même sur la tension de vapeur de la solution, la dépression sera précisément ce que l'expérience prouve qu'elle est. L'accord sera établi.

Le calcul peut se faire d'une manière générale.

Supposons la solution contenant n molécules dans 100 grammes d'eau.

Soit a le nombre de molécules *ionisées*, et supposons que chacune fournisse p ions. Le nombre total des molécules actives sera donc :

$$\nu = n - a + pa = n + (p-1)a.$$

C'est à ce nombre total que, suivant la théorie, sera applicable la loi tonométrique. On aur donc :

$$\frac{f-f'}{f.\nu} = 0{,}185.$$

D'autre part, soit ρ la valeur réellement fournie par l'expérience pour la dépression moléculaire de la solution considérée ; on a donc, en réalité :

$$\frac{f-f'}{f.n} = \rho$$

d'où, divisant

$$\frac{\nu}{n} = \frac{\rho}{0{,}185} = i, \text{ par définition} \ldots. (\alpha)$$

c'est-à-dire

$$\frac{n+(p-1)a}{n} = \frac{\rho}{0{,}185}$$

d'où l'on tire, en appliquant les règles des proportions,

$$\frac{(p-1)a}{n} = \frac{\rho - 0{,}185}{0{,}185}$$

et enfin

$$d = \frac{a}{n} = \frac{\rho - 0{,}185}{0{,}185 \times (p-1)} \qquad \text{(XXVIII)}$$

Tel est le *degré de dissociation* ou *degré d'ionisation*, d.

En admettant donc que, dans la solution considérée, il y ait, sur n molécules, un nombre a de ces molécules ionisées, et que toutes obéissent à la loi tonométrique, l'accord sera établi entre la théorie et l'expérience. La formule plus haut (α) comparée à (XXVIII) fournit :

$$d = \frac{i-1}{p-1} \ldots. (\beta)$$

La dissociation en ions n'est pas la seule cause qui puisse modifier le nombre des molécules introduites dans le dissolvant. Il peut se produire (particulièrement dans le cas des solutions concentrées) un phénomène qui a le même résultat, et qui consiste en ce que des molécules d'eau peuvent se fixer sur les molécules entières du corps dissous, ou même sur ses ions, de manière à constituer des hydrates.

On conçoit, sans peine, qu'en disposant convenablement de ces deux éléments, le nombre des molécules dissociées, le nombre des molécules hydratées, on pourra toujours faire cadrer les résultats expérimentaux avec l'hypothèse de l'action identique exercée par toute molécule sur la tension de vapeur du dissolvant, c'est-à-dire faire rentrer dans la loi tonométrique les corps en apparence aberrants.

115. Degré de dissociation des diverses catégories de sels pour des concentrations moléculaires comparables. — On est amené ainsi à supposer que tous les sels formés de deux radicaux monoatomiques (formule MA, tels que KCl, KBr, RbCl, etc.), en solutions étendues (contenant de 0,1 à 0,4 de molécule-gramme pour 100 grammes d'eau), subissent une dissociation en ions portant sur environ 83 molécules pour 100.

(On a : dépression moléculaire $= 0{,}32$ et $i = 1{,}83$ pour KCl; dépression $= 0{,}35$ et $i = 1{,}88$, pour KI.)

— Pour les sels de la seconde catégorie (M^2A), tels que le chromate de potasse K^2CrO^4, décomposables en deux ions positifs monoatomiques 2K et un ion diatomique CrO^4, on a trouvé comme degré d'ionisation 0,57, pour des degrés de concentration comparables à ceux de tout à l'heure. C'est dire que sur 100 molécules de chromate de potasse il y en a 58 d'ionisées. Il y a donc $42 + 58 \times 3 = 216$ molécules au lieu des 100 que l'on croirait. — Il faut, en d'autres termes, faire cette supposition pour que l'expérience cadre avec la loi tonométrique.

— Pour les sels de la troisième catégorie (formule MA^2), tels que l'azotate de baryte ($Ba2AzO^3$), constitués d'un ion positif diatomique Ba et de deux ions négatifs monoatomiques $2AzO^3$, on trouve pour degré d'ionisation 0,44. Pour l'azotate de magnésie $Mg2AzO^3$, on trouve 0,59, soit 59 p. 100 de molécules ionisées.

— Quant à la quatrième catégorie (sulfates magnésiens $MgSO^4$), ces sels, formés de deux ions biatomiques, produisent une diminution de tension inférieure à la normale. Ils se comportent donc comme si le nombre des molécules diminuait dans la dissolution, comme si les solutions n'étaient pas dissociées en ions, mais au contraire condensées.

116. *Théorie de S. Arrhénius. — Théorie des abaissements partiels de Raoult.*

La théorie d'Arrhénius, en faveur actuellement, consiste à admettre que *chaque molécule électrolytique, comme chaque molécule chimique, exerce, quelle que soit sa nature, la même action dépressive sur la tension de vapeur des solutions.*

La condition pour qu'il y ait accord de cette théorie avec les faits, c'est de la compléter en admettant pour les diverses solutions des degrés de dissociation divers. Par exemple, 0,83 pour le KCl; 0,57 pour le chromate de potasse ; 0,44 pour l'azotate de baryte (pour des concentrations variant entre 0,1 et 0,6 du poids moléculaire m dans 100 grammes d'eau).

Raoult s'est proposé de saisir la loi qui régit les valeurs particulières des dépressions moléculaires lorsque l'on passe d'une solution d'un sel à la solution d'un sel différent. Il vit que la variété de ces nombres semblait liée à la constitution électrolytique de ces corps, au moyen de radicaux électro-positifs et radicaux électro-négatifs ou *ions.*

— On peut retrouver la valeur numérique de la dépression moléculaire dans chaque cas particulier, en supposant le corps décomposé en ces éléments, et chacun d'eux exerçant, pour son compte, une dépression convenablement choisie.

Par exemple :

Il faut d'abord considérer s'il s'agit d'un radical monoatomique ou diatomique. La diminution moléculaire due au radical monoatomique est double de celle qui est due à un radical diatomique.

Par exemple, pour les ions négatifs (Cl, OH, AzO^3), la dépression moléculaire relative à l'eau

est la valeur normale, (c'est-à-dire la centième partie du poids moléculaire de l'eau — soit 0,18).

Les ions négatifs diatomiques ou divalents (SO^4, CrO^4) exercent une dépression moléculaire moitié moindre, soit 0,09.

Les ions positifs monoatomiques (H, K, Na, AzH^4) exercent une dépression moléculaire de 0,16.

Les ions positifs diatomiques (Ba, Mg, Al) exercent une dépression moléculaire moitié moindre, 0,8.

Exemple :

Dépression de vapeur exercée par une molécule de NaCl dissoute dans 100 grammes d'eau :

On a, pour Na, 0,16, et pour Cl, 0,18 = 0,34.

Dépression exercée par une molécule de bichromate de potassium :

Pour $2 \times$K, $2 \times 0,16 +$ pour CrO^4, $0,09 = 0,41$.

L'expérimentation a donné à Raoult et à Tammann 0,33 et 0,42, c'est-à-dire des chiffres qui concordent au centième près.

On peut se demander quel rapport il y a entre cette règle de Raoult et la théorie d'Arrhénius. On remarquera que la théorie de Raoult était un acheminement vers la théorie d'Arrhénius, aujourd'hui dominante, mais qu'elle ne se confondait pas avec elle.

La première ne se proposait pas, comme la seconde, de rendre compte de la valeur des dépressions, dans toutes les circonstances, pour toutes les concentrations; mais seulement, de la dépression moléculaire pour une concentration convenable, correspondant à l'origine de la courbe (***118***).

Ces solutions, Raoult put les envisager comme ayant subi une *dissociation complète en ions* (deux ou plusieurs par molécule) *ayant une valeur dépressive différente*. Il n'y avait là point de place pour l'idée d'une dissociation incomplète et variable, ni pour celle de l'égalité tonométrique de toute molécule.

La conception d'Arrhénius vient d'ailleurs se confondre avec celle de Raoult dans le cas limite (dilution infiniment croissante) que celui-ci a eu en vue.

La même observation que nous faisons ici pour la tonométrie, à propos de la conception primitive de Raoult, vaut pour la pression osmotique et la conception primitive de De Vries. L'une et l'autre différaient de la même façon de la conception définitive d'Arrhénius (Voy. n^{os} ***67*** et ***89***). L'une et l'autre poursuivaient l'accord expérimental en supposant une ionisation identique et une action moléculaire différente, tandis que l'on admet aujourd'hui, avec Arrhénius, une ionisation différente et une action moléculaire identique.

117. Marche de l'ionisation quand la concentration varie. Cas des solutions typiques. — Si l'on détermine le degré d'ionisation pour des solutions d'une même substance à des degrés différents de concentration, on verra que l'influence de la concentration se traduit de manières différentes, suivant le sel considéré.

Considérons la catégorie de sels qui cristallisent à l'état anhydre, à la température ordinaire, et dont le chlorure de rubidium peut nous fournir le type.

Dans ce cas, la dépression moléculaire est constante, alors que la concentration varie de 0,1 à 0,8 du poids moléculaire pour 100 d'eau ; cela indique que le degré d'ionisation reste le même. La dissociation ne croît donc pas avec la dilution, au moins dans ces limites cependant très étendues.

Ainsi, pour la plupart des sels qui cristallisent à l'état anhydre, *le degré de*

dissociation en ions est sensiblement le même pour des degrés de concentration très différents (depuis la solution normale jusqu'à la solution décuple).

C'est un fait remarquable, en dépit de son caractère approximatif. Il s'est reproduit dans les recherches plasmolytiques de De Vries (nº ***89***) et dans les recherches cryoscopiques de Raoult. *La dissociation en ions ne suit pas une marche continue. Elle ne progresse pas régulièrement avec la dilution.*

Mais ce n'est pas là, tant s'en faut, la condition de toutes les solutions salines. Ce n'est vrai que pour cette catégorie. Il faut noter d'ailleurs qu'il s'agit ici de concentrations assez fortes. En fait, pour les solutions très diluées, l'ionisation augmente progressivement lorsque la dilution augmente. Cela se produit à partir de la solution contenant 0,02 du poids moléculaire dans 100 grammes d'eau.

En général, le degré de dissociation varie avec la concentration, dans le même sens que varie avec elle l'abaissement moléculaire, mais non pas d'une manière parallèle. La formule (XXVIII, ***114***) montre que le degré d'ionisation d croît et décroît avec ρ. Ce sont donc les courbes représentant l'abaissement moléculaire en fonction de la concentration qui renseigneraient à cet égard.

Ces indications sur l'influence de la concentration nous conduisent à l'étude de la seconde anomalie des solutions d'électrolytes.

118. Seconde anomalie des solutions d'électrolytes : Variation de la dépression moléculaire de vapeur du dissolvant avec la concentration de la solution. — La dépression moléculaire relative, qui est constante pour les solutions vraies et normales (***108***), ne l'est point pour les pseudo-solutions salines ; ou, du moins, elle ne l'est que pour une catégorie sur les trois que l'on peut distinguer parmi ces solutions.

Si l'on détermine la dépression moléculaire pour des solutions d'une même substance électrolyte à des concentrations différentes, on verra qu'elle se traduit de trois manières différentes, selon l'espèce de sel considérée.

Une de ces catégories est typique ; c'est celle des sels qui cristallisent à l'état anhydre à la température ordinaire.

Le chlorure de rubidium peut servir d'exemple. Voici, d'après Tammann, les dépressions moléculaires pour des concentrations variant du simple au décuple, ou à peu près, c'est-à-dire pour des solutions contenant de 1 à 8 dixièmes du poids moléculaire pour 100 d'eau ($n = 0{,}1$ à $n = 0{,}8$). RbCl, poids atomique = 120,5.

Pour	$n=0{,}1$	$n=0{,}2$	$n=0{,}3$	$n=0{,}4$	$n=0{,}5$	$n=0{,}6$	$n=0{,}7$	$n=0{,}8$
Dépression moléculaire.	0,324	0,329	0,336	0,332	0,338	0,342	0,341	0,335

Dans ce cas, la dépression moléculaire est constante ; mais encore, faut-il remarquer qu'il s'agit de concentrations assez fortes.

Pour les deux autres catégories, il n'en est pas de même. Si pour celles-ci on construit les courbes de dépression moléculaire, ces lignes, au lieu de rester sensiblement parallèles à l'axe des abscisses (concentrations), s'en

éloignent ou s'en rapprochent : la dépression moléculaire, dans le premier cas, augmente avec la concentration ; dans le second cas, elle diminue.

Comme exemples des solutions du premier genre, on peut prendre celles de chlorure de lithium.

Concentrations en molécules-grammes.	$n=0,1$	$n=0,2$	$n=0,3$	$n=0,4$	$n=0,5$	$n=0,6$	$n=0,7$	$n=0,8$
Dépressions moléculaires.	0,356	0,376	0,417	0,436	0,462	0,481	0,497	0,512

La première ligne indique le nombre de molécules-grammes de substance dissoutes dans 100 grammes d'eau. Le poids atomique ou molécule-gramme du chlorure de lithium étant 42,5, les concentrations précédentes répondent à $4^{gr},25$ pour 100 grammes d'eau pour la première, et pour les suivantes : $8^{gr},50$; $12^{gr},75$; $16^{gr},80$; $21^{gr},25$; $25^{gr},50$; $29^{gr},75$; 34 grammes ; pour 100 grammes d'eau. La seconde ligne indique les dépressions moléculaires mesurées.

Appartiennent à cette catégorie les solutions de KFl ; KOH ; NaOH ; NaCl ; NaBr ; NaI ; LiBr ; LiI ; H^2SO^4 ; $MgSO^4$; $CuSO^4$; $CaCl^2$; $SrCl^2$; $ZnCl^2$; $CoCl^2$; $NiCl^2$; $Mg(2AzO^3)$; $Zn,2AzO^3$.

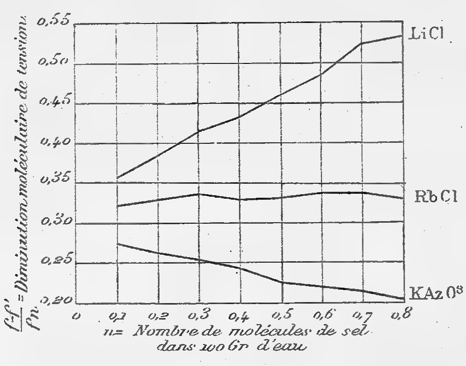


Fig. 446. — Influence de la concentration sur la dépression moléculaire des solutions salines.

Les solutions du second genre, pour lesquelles la dépression moléculaire diminue à mesure que la concentration augmente, sont représentées par l'azotate de potassium $KAzO^3$.

Voici, pour ce sel, les déterminations de Tammann :

Concentrations en molécules-grammes.	$n=0,1$	$n=0,2$	$n=0,3$	$n=0,4$	$n=0,5$	$n=0,6$	$n=0,7$	$n=0,8$
Dépressions moléculaires.	0,278	0,264	0,253	0,245	0,232	0,224	0,216	0,209

Les azotates de sodium et d'ammonium sont dans le même cas.

Raoult a fait remarquer qu'en construisant les courbes correspondant à ces valeurs pour les trois catégories de sels, ces lignes se confondent sensiblement avec des droites diversement inclinées sur l'axe des abscisses, au moins

dans la première portion de leur tracé (de $n = 0{,}1$ à $n = 0{,}3$ ou $n = 0{,}5$).

Dans ces limites, il suffit donc de deux déterminations expérimentales, pour deux concentrations différentes, pour avoir sensiblement la courbe exacte.

119. *Explication de la seconde anomalie des pseudo-solutions salines. Hypothèse de l'hydratation.* — L'hypothèse de la dissociation des électrolytes, sels, etc., en ions a suffi pour expliquer la majoration de la dépression moléculaire, qui, au lieu d'être constante et égale à 0,185, est en général supérieure.

Lorsque la concentration diminue au-dessous d'une certaine limite (au-dessous de $n = 0{,}02$), la dissociation augmente : pour une dilution infinie ($n = 0$), la dissociation est complète et, derechef, la dépression moléculaire atteint une valeur limite. On l'obtient en prolongeant jusqu'à l'axe des ordonnées la droite qui représente la graphique de la dépression entre $n = 0{,}1$ et $n = 0{,}5$.

Mais, pour les concentrations plus grandes, l'ionisation ne varie pas, ou ne varie que peu. En tous cas, les variations de l'ionisation ne sauraient expliquer les variations de la dépression de vapeur, puisque cette dernière suit une marche contraire à celle qui serait due à la dissociation. La dilution ne peut, en effet, qu'accroître le nombre des molécules, des ions, et par conséquent, augmenter la dépression de vapeur. Or, c'est l'inverse qui a lieu pour le chlorure de rubidium et les sels de la même catégorie. La dépression diminue à mesure que la dilution augmente.

Il faut donc imaginer une cause agissant en sens contraire de la dilution. L'hydratation (qui est d'ailleurs un fait expérimental prouvé par la cristallisation des hydrates) réalise cette condition. On conçoit, en effet, que si un certain nombre de molécules du dissolvant (eau) se fixent sur le corps dissous, il suffit d'imaginer que ce nombre augmente à mesure que la concentration augmente, et diminue à mesure que la dilution devient plus grande, pour que l'effet compense partiellement l'ionisation.

De fait, la plupart des sels dont nous avons donné la liste et qui se comportent comme le chlorure de lithium, cristallisent à l'état d'hydrates. Les uns, comme KFl; KOH ; NaOH ; NaBr ; NaI ; LiCl, cristallisent avec 2 molécules d'eau ; d'autres cristallisent avec 3 molécules d'eau, tels LiI ; LiBr ; d'autres avec 5 molécules d'eau, comme $CuSO^4$; d'autres avec 6, comme $CaCl^2$; $SrCl^2$; $CoCl^2$; $NiCl^2$; $Mg,2AzO^3$; $Zn,2AzO^3$, et il est naturel de supposer qu'ils existent dans les solutions, plus ou moins complètement, à un certain état d'hydratation.

On peut faire des hypothèses sur le degré d'hydratation de telle ou telle solution, et disposer de ce degré précisément de manière à rendre compte du résultat expérimental, c'est-à-dire à obtenir la valeur vraie de la dépression de vapeur. L'accord s'obtient, le plus souvent, en supposant que les sels qui cristallisent à l'état hydraté existent également à l'état hydraté dans leurs solutions, à 100° — et qu'ils y sont même à un degré d'hydratation plus avancé que dans leurs cristaux. — Les choses se passent comme si les *ions* qui résultent de la dissociation électrolytique pouvaient eux-mêmes s'emparer de l'eau, et exister à l'état d'hydrates.

On arrive ainsi à des conceptions vraisemblables sur la constitution des solutions salines.

120. *Solutions des sels dans les autres liquides : alcool, éther, acétone, etc.* — L'étude des solutions alcooliques a été poursuivie parallèlement à l'étude des solutions aqueuses. L'alcool éthylique se rapproche de l'eau, en ce sens que c'est un dissolvant neutre et qu'il dissout un grand nombre de sels. On a examiné particulièrement les solutions de chlorure de lithium, iodure de potassium, chlorure de calcium, azotate de calcium, acétate de potassium, bichlorure de mercure, chlorate de sodium, et on a été conduit à cette conclusion que : dans les dissolutions alcooliques concentrées, les sels existent à l'état d'alcoolates, renfermant à peu près le même nombre de molécules d'alcool qu'à l'état cristallisé. — L'ionisation serait à peu près nulle dans les dissolutions alcooliques quelque peu concentrées. Et ces solutions non ionisées conduisent cependant bien l'électricité.

C'est là un résultat qu'il faut noter, parce qu'il est en désaccord avec la théorie générale de la dissociation électrolytique.

Les sels ne semblent pas davantage s'ioniser dans les autres menstrues tels que l'éther, l'acétone, etc. Ils y produisent à peu près la même diminution moléculaire de tension ou la même élévation du point d'ébullition que les matières organiques (1). L'ionisation est un fait particulier au dissolvant eau.

(1) F.-M. Raoult, *Tonométrie*, p. 108-112.

CRYOSCOPIE

§ II. — POINT DE CONGÉLATION DES SOLUTIONS (1).

SOMMAIRE. — A. **Dissolutions véritables.** — **121.** La présence d'une substance dissoute abaisse la point de congélation de l'eau. — **122.** Le produit de la congélation d'une solution est de la glace pure. Solutions saturées : point cryohydratique. — **123.** Loi de Blagden. L'abaissement du point de congélation est proportionnel à la concentration. — Restrictions. — **124.** Relations de la cryoscopie avec l'osmose, la tonométrie, et, en général, avec l'étude des propriétés des solutions. — **125.** Programme de la cryoscopie. — **126.** Congélation de l'eau. Détermination du point de congélation. Phénomène de la surfusion. — **127.** Température de congélation d'une solution aqueuse. Ses deux définitions. — **128.** Méthode usuelle des Laboratoires. Appareil de Beckmann. — **129.** Cryoscopie de précision. — **130.** Des deux méthodes employées en cryoscopie. — A. Méthode de congélation après surfusion. — B. Méthode avec gaine de glace. — C. Réfrigérants. — **131.** Appareils de précision. Appareil de Raoult. Appareil de Ponsot. — **132.** Marche d'une détermination. — α. Point de congélation de la solution. — β. Point de congélation de l'eau pure. — γ. Abaissement correspondant à la solution primitive. — **133.** Limite de précision de la cryoscopie. — **134.** Influence de la pression sur le point de congélation d'une solution. — **135.** L'abaissement du point de congélation (solidification) est un fait universel pour toutes les solutions. — **136.** Diverses formes données à l'abaissement cryoscopique : coefficient d'abaissement $\frac{\Delta}{c}$; abaissement moléculaire $\frac{\Delta}{n}$; abaissement produit par une molécule dans 100 du dissolvant. — **137.** Influence de la concentration. — A. Expériences sur le sucre de canne. — B. Expériences sur l'alcool. — C. Sur l'acide acétique. — D. Conclusion : correction de la loi de Blagden. — **138.** Influence de la nature du corps dissous. — Loi de Raoult : Tous les corps dissous, non électrolytes, produisent le même abaissement moléculaire à l'origine. — **139.** Restriction. Existence de deux valeurs pour l'abaissement moléculaire limite. Tableau des valeurs de l'abaissement moléculaire normal. — **140.** Influence de la nature du dissolvant. — **141.** Les propriétés principales des solutions sont des propriétés additives. — **142.** Principe des applications de la cryoscopie.

B. **Pseudo-solutions. Solutions salines.** — **143.** Les deux anomalies des pseudo-solutions. Courbes des abaissements moléculaires. — **144.** Anomalie de majoration de l'abaissement moléculaire. Coefficient ou facteur de correction i. — **145.** Anomalie d'infraction à la loi des concentrations. Variation de l'abaissement moléculaire avec la concentration. Solutions typiques. Autres solutions. L'hypothèse d'Arrhénius fait disparaître cette anomalie. — **146.** Explication de l'anomalie de majoration de l'abaissement moléculaire. — A. Hypothèse de la dissociation en ions. — B. Degrés de dissociation ou d'ionisation. — C. Calcul du degré d'ionisation. — D. Degré d'ionisation des diverses catégories de solutions d'électrolytes. — **147.** Théorie du degré d'ionisation d'Arrhénius. Théorie des abaissements partiels de Raoult. **148.** Conséquences de la théorie d'Arrhénius. Généralisation de la loi de Blagden et de la loi d'addition moléculaire. — Marche de l'ionisation. Interprétation des courbes d'abaissement moléculaire. — **149.** Accord entre les mesures osmotiques, tonométriques et cryoscopiques, au point de vue particulier de l'ionisation et au point de vue général. — **150.** Application de la cryoscopie à la détermination des poids moléculaires. — Objections. — **151.** Applications physiologiques. Cryoscopie d'un mélange. Osmose.

Le mot de « cryoscopie » signifie littéralement « examen de la glace ». Il a été employé pour la première fois par M. Raoult dans une communication à l'Académie des Sciences, le 22 juin 1885.

(1) *Nota.* — Dans cet exposé de la cryoscopie, je me suis aidé, en quelques endroits d'un travail inédit de M. Ponsot. Voici ces emprunts : nº *127*, sur quelques points ; description de la méthode de l'auteur, nºs *129, 130, 131, 132 et 134,* reproduits presque littéralement. (DASTRE).

La cryoscopie a pour objet la mesure de la température de congélation des liquides, purs ou tenant en solution d'autres corps, et l'examen de toutes les conséquences que l'on peut tirer de ces mesures. Pour les besoins de la physiologie, on n'a à considérer que les solutions aqueuses.

a. Dissolutions véritables.

121. La présence d'une substance dissoute abaisse le point de congélation de l'eau. — C'est un fait d'observation vulgaire que l'eau qui tient en dissolution des matières étrangères, des sels par exemple, se congèle plus difficilement que l'eau pure ; ou, pour parler plus exactement, elle ne se prend en glace qu'à une température plus basse. Il y a retard ou abaissement du point de congélation.

Pendant les froids de l'hiver, l'eau douce des lacs et des étangs se recouvre de glace bien avant l'eau saumâtre des flaques marines. Les rivières charrient des glaçons bien avant qu'il ne s'en produise à la surface de la mer. Il y a plus : ceux qui s'étaient formés dans l'eau des fleuves, ne peuvent se maintenir lorsqu'ils arrivent dans l'eau marine ; non pas seulement, comme on le dit, parce que celle-ci serait plus chaude ou plus agitée, mais parce qu'elle est plus salée. La glace d'eau douce disparaîtrait encore dans l'eau de mer lors même que la température et les autres conditions seraient exactement les mêmes de part et d'autre.

De même, la sève des plantes et les liquides organiques, qui sont des solutions aqueuses de substances diverses, se conservent liquides, alors que l'eau extérieure se congèle ; c'est là une des circonstances qui permettent aux plantes de résister aux froids modérés.

Tandis que l'eau pure se prend en glace lorsque la colonne de mercure du thermomètre, dans sa descente, atteint le point zéro, l'eau restera liquide et mobile non seulement au zéro, mais au-dessous, si elle tient en dissolution quelque corps étranger. Il faut un froid plus intense, une température plus basse, par exemple — 2°, — 3°, pour que les particules de l'eau s'agrègent et s'immobilisent en une masse solide.

L'influence du corps dissous dans l'eau consiste donc à retenir les molécules du liquide dissolvant, à les empêcher de se grouper pour passer à l'état solide : elle rend nécessaire, pour produire la solidification, une action plus énergique, un froid plus intense.

122. Le produit de la congélation d'une solution est de la glace pure. Solutions saturées : point cryohydratique. — La solidification ou congélation de l'eau d'une solution exige un premier travail, à savoir la séparation du corps dissous d'avec le dissolvant. Le phénomène s'accomplit en deux temps : premier temps, séparation du corps dissous d'avec l'eau dissolvante ; deuxième temps, solidification de celle-ci.

Le corps solide, transparent, qui se forme, est de la *glace pure*.

On le sait aujourd'hui, mais cette notion n'a pas été établie sans peine, au moins dans le cas des solutions concentrées. Un savant distingué, Dufour,

croyait encore, en 1860, que le solide qui se sépare sous l'action du froid était, comme le liquide originel, un mélange d'eau congelée et du corps inclus. Un autre physicien, Guthrie, en 1875, y voyait un composé des deux corps, un *cryohydrate*, c'est-à-dire une combinaison de toute la glace formée avec une petite proportion du sel. C'est là une erreur. L'eau se sépare, pure, à l'état de cristaux qui s'enchevêtrent en un bloc compact. Si l'analyse chimique y retrouve de petites proportions du sel, c'est que les cristaux de glace ont emprisonné un peu de la solution, et par conséquent du corps dissous, entre leurs lamelles. La congélation est un moyen de solidification des corps mélangés, au même titre que la cristallisation.

Il n'y a qu'un seul cas où le sel se dépose en même temps que les cristaux de glace ; c'est lorsque la solution est *saturée* : que cette saturation, d'ailleurs, existe dès le début, ou qu'elle survienne par suite de la séparation progressive de quantités d'eau congelée de plus en plus grandes. Une solution, même étendue, se concentre, en effet, par suite des progrès de la congélation, et arrive à être chargée à refus. Quand on refroidit une solution de ce genre, l'eau ne peut se séparer et se solidifier, sans libérer une partie du corps dissous qui, dans ce milieu saturé, se solidifie forcément. — Il se fait donc un mélange solide : la proportion des deux corps y est la même que dans la solution saturée primitive : la concentration maxima de la solution se conserve invariablement jusqu'à solidification complète. Et, pendant la durée de cette opération, la température se maintient constante. Cette température, c'est le *point cryohydratique*.

Il est clair, d'après cela, que l'on s'exprime incorrectement quand on parle de la congélation d'une solution. Ce n'est pas la solution qui se congèle, c'est l'eau.

123. Loi de Blagden. *L'abaissement du point de congélation est proportionnel à la concentration*. — Restrictions. — On savait plus ou moins vaguement que les solutions se congèlent à une température plus basse que l'eau pure. Un savant anglais, Blagden, en 1788, fit un examen attentif de ce fait. Il reconnut que l'abaissement de la température de congélation au-dessous du zéro des thermomètres était d'autant plus grand qu'il y avait plus de sel dans l'eau, c'est-à-dire que la solution était plus concentrée. Il établit, à cet égard, une loi qui est connue dans la science sous le nom de *Loi de Blagden*. D'après cette loi, *l'abaissement du point de congélation d'une solution est proportionnel à la concentration, c'est-à-dire au poids du sel dissous dans un même poids d'eau.*

On a :

$$\Delta = k.c$$

en désignant par Δ l'abaissement du point de congélation, c la concentration, c'est-à-dire le nombre de grammes du corps dissous dans 100 grammes d'eau.

Une solution de chlorure de sodium au centième se congèle à — 0°,585 : l'abaissement est 0,585. La solution à 2 p. 100 se congèle à — 1°,170 : l'abaissement est double du précédent. Il est triple pour la solution à 3 p. 100, qui se congèle à — 1°,755 ; quadruple pour la solution à 4 p. 100 qui se prend à — 2°,260. La proportionnalité des abaissements de congélation aux concentrations se vérifie ici fort exactement.

Ces détails font comprendre, entre autres choses, que la formation des glaces soit la plus tardive dans les eaux marines dont la salinité est la plus forte. La Baltique est une mer qui se dessale de plus en plus ; son eau est presque douce ; c'est aussi l'une des premières qui soit prise par les glaces. Il suffit que, dans une crique tranquille, la température s'abaisse de deux à trois dixièmes au-dessous de zéro pour que la glace apparaisse. L'eau de l'Océan atlantique contient neuf à dix fois plus de sel : à l'abri de l'agitation, elle ne se prend en glace que lorsque la température tombe à près de 2° au-dessous de zéro.

La loi de Blagden reçut une vérification partielle des recherches de Despretz (1839-1840) et plus tard de celles de Rossetti (1869) sur le maximum de densité des solutions.

Voici, par exemple, les nombres relatifs au chlorure de sodium, fournis par ces deux observateurs :

Concentrations. Poids de NaCl, p. 100 gr. d'eau	0,5	1	1,237	2	2,474	3	3,74	4	6	7
Température de congélation.	—0,32 (Rossetti.)	—0,65 (R.)	—0,71 (Despretz.)	—1,27 (R.)	—1,41 (D.)	—1,90 (R.)	—2,12 (D.)	—2,60 (R.)	—3,91 (R.)	—4,60 (R.

Pour la *potasse pure* (KOH), Despretz trouve —2°,10 comme point de congélation de la solution contenant 3gr,711 de substance, et 4°,33 pour la solution contenant 7gr 422.

Pour ces substances et dans ces limites de concentration, on a donc

$$\Delta = A \times c \text{ ou } \frac{\Delta}{c} = A \qquad (1)$$

Δ étant l'abaissement de congélation pour la solution de concentration c, c'est-à-dire contenant c grammes du corps dans 100 grammes d'eau, et A une constante.

Les recherches de Rüdorf, en 1862, établirent que la loi de Blagden ne se vérifie, en général, pour les solutions salines, que lorsqu'elles sont étendues. Les solutions salines concentrées lui échappent plus ou moins.

La loi de Blagden a donné lieu à beaucoup de discussions. Quelques physiciens ont été frappés des nombreux démentis qu'elle reçoit de l'expérience. Rüdorf, en 1864, a constaté qu'elle était décidément inexacte pour les solutions concentrées, riches en sel. — Ce n'est que pour les solutions pauvres, très étendues, comme celles dont nous venons de parler, qu'il peut être question de proportionnalité entre l'abaissement cryoscopique et la concentration. — Et même dans ce cas, des expérimentateurs rigoureux, comme M. Ponsot, n'admettent son exactitude qu'entre des limites très restreintes.

Au contraire, les théoriciens de la physico-chimie nouvelle considèrent la loi de Blagden comme fondamentale. Elle constitue une sorte de postulat : les démentis de l'expérience s'expliquent ; les écarts ont une cause générale plausible. Cette cause, c'est l'état de dissociation ou, tout au contraire, de condensation du corps dissous.

Il y a lieu de distinguer ici, comme on l'a vu pour l'osmose et la tonomé-

trie, les dissolutions véritables des pseudo-solutions. Les solutions véritables, c'est-à-dire celles où le corps dissous n'est pas modifié par le dissolvant, ne s'y combine point, ne s'y dissocie point, mais s'y diffuse seulement ; comprennent les dissolutions des divers corps dans les liquides autres que l'eau ; et, parmi les dissolutions aqueuses, celles des substances organiques. On peut les définir d'un mot, en disant qu'elles ne sont point conductrices de l'électricité et décomposables par le courant. Les lois générales de la cryoscopie, et, particulièrement la loi de Blagden, s'y appliquent.

Les autres solutions aqueuses sont des pseudo-solutions. Elles sont conductrices de l'électricité. Le corps dissous ne paraît pas y avoir conservé sa constitution. On suppose qu'il s'y dissocie ou s'y condense : en tout cas, on est sûr qu'il s'y combine, dans beaucoup de cas, avec l'eau, pour former des hydrates divers. Ces solutions aqueuses d'électrolytes comprennent les solutions salines et les solutions d'acides forts et des bases fortes, c'est-à-dire précisément celles que l'on a pris l'habitude de considérer, à tort, comme le type des solutions. Elles ne suivent pas exactement les lois générales de la cryoscopie, pas plus que celles de l'osmose ou de la tonométrie. On conçoit que les physiciens les aient considérées comme aberrantes.

L'étude cryoscopique des dissolutions aqueuses était donc restée impuissante dans les mains des expérimentateurs tels que Blagden, Despretz, de Coppet, Rüdorf..... Au contraire, la considération des solvants autres que l'eau a conduit Raoult et Arrhénius à des règles fixes. Enfin, les lois générales sont apparues lorsque l'examen des nombres expérimentaux a été vivifié par la théorie, c'est-à-dire par l'introduction de la notion moléculaire.

124. Relations de la cryoscopie avec l'osmose, la tonométrie, et, en général, avec l'étude des propriétés des solutions. — Nous avons dit que l'opération de la congélation d'une solution, comparée à la congélation du dissolvant pur, exigeait un travail supplémentaire préalable ; c'est, à savoir : la séparation des molécules du corps dissous d'avec celles du corps dissolvant qui les retiennent. L'abaissement du point de congélation est en rapport avec ce travail supplémentaire de séparation.

Il y a d'autres moyens d'exécuter ce même travail. On peut séparer le dissous du dissolvant par l'osmose à travers une membrane hémiperméable et on montre facilement que les variations de la pression osmotique permettent de mesurer le travail (***92***). — On peut encore effectuer la même séparation au moyen de l'évaporation qui enlèvera le liquide à l'état de vapeur — ou encore, en introduisant un autre corps soluble qui soustraira au premier une partie de son solvant. — En évaluant ces travaux, dans chaque cas, en fonction des paramètres physiques correspondants — et en écrivant que ces travaux de séparation sont égaux pour la même quantité de dissolvant séparée de la même quantité de corps dissous, on aura une relation entre ces diverses grandeurs : pression osmotique π ; abaissement du point de congélation Δ ; élévation du point d'ébullition Π ; dépression de vapeur, etc.

C'est là ce qui fait l'intérêt de la cryoscopie. C'est que la température de congélation est liée par un lien étroit aux autres propriétés des solutions et

permet, par suite, d'étudier celles-ci, et d'obtenir des renseignements très intimes sur la nature des solutions, sur leur constitution, et spécialement sur leur concentration moléculaire, c'est-à-dire sur le nombre des particules physiques ou molécules qui existent dans un volume donné de la solution. Les mesures cryoscopiques fournissent même le moyen le plus simple et le plus sensible, quoique indirect, d'obtenir la pression osmotique, la dépression de vapeur, et généralement toutes les autres constantes caractéristiques d'une solution donnée (**110**).

125. *Programme de la cryoscopie.* — On aperçoit facilement le champ ouvert aux études cryoscopiques. Le point de départ, c'est la détermination du point de congélation de telle solution déterminée et du solvant pur. Il y a, pour cela, des méthodes de mesure et une instrumentation spéciales.

En second lieu, une fois obtenus les résultats numériques, il faut les confronter avec les conditions qui les font varier. Il faut chercher les relations qui lient l'abaissement du point de congélation à la quantité du corps dissous, c'est-à-dire à la concentration des solutions — à la pression extérieure — et enfin à la nature chimique des deux corps, dissous et dissolvant.

Ces deux catégories de relations s'expriment par les lois de Blagden et de Raoult.

Il faut ensuite donner une expression précise aux rapports que nous avons signalés entre les données cryoscopiques, tonométriques, osmotiques et autres, relatives aux solutions. Le chapitre des applications viendrait clore ce programme, dont on ne trouvera ici qu'une simple esquisse.

Mesures. — Les mesures cryoscopiques s'accompliront en deux temps : il s'agit de mesurer exactement la température de congélation du dissolvant pur — ici de l'eau ; — et, en second lieu, la température de congélation de la solution. La différence donne, pour la solution en question, l'abaissement Δ du point de congélation. Le point de congélation de l'eau est plus facile à définir que celui des solutions. Commençons par lui.

126. *Congélation de l'eau. Détermination du point de congélation. — Phénomène de la surfusion.* — La détermination du point de congélation de l'eau, c'est la détermination du point 0 des thermomètres. Les lois élémentaires de la fusion et de la solidification des corps enseignent que le point de fusion du corps solide qui se liquéfie, se confond avec le point de solidification du liquide qui se solidifie, et que, pendant la durée de l'un ou l'autre de ces actes, la température reste fixe.

Le zéro de l'échelle thermométrique est donc à la fois la température de fusion de la glace que l'on réchauffe et la température de congélation de l'eau qu'on refroidit.

La congélation de l'eau pure est un phénomène plus ou moins brusque ; il n'est jamais instantané. Il a une certaine durée pendant laquelle il existe dans un mélange d'une partie liquide qui va en diminuant et d'une partie solide qui va en augmentant. Il en est de même pour le phénomène inverse de la

fusion de la glace ; seulement, dans ce cas, c'est le liquide qui augmente et le solide qui diminue. Le mélange pendant tout le temps qu'il subsiste, soit qu'il marche vers la fusion totale, ou vers la solidification totale, conserve, d'après la loi physique bien connue, une température permanente, invariable et fixe, dont la fixité même a été utilisée pour définir le point 0 du thermomètre.

La loi de la fixité du point commun de fusion et de solidification exprime qu'il n'y a d'équilibre stable pour l'eau solide qu'au-dessous du zéro — et qu'il n'y a d'équilibre stable pour l'eau liquide qu'au-dessus de ce point. Si peu que la température s'élève au-dessus de ce point, la glace passe à l'état d'eau ; si peu qu'elle s'abaisse au-dessous, l'eau passe à l'état de glace. Le zéro est le point de rencontre de ces changements d'état. Il peut être défini : le *point précis, idéal, où l'eau est en équilibre avec la glace.*

Le principe que nous venons d'énoncer, qu'il n'y a d'équilibre stable pour l'eau liquide qu'au-dessus du zéro, subit une sorte d'exception apparente : le phénomène de la *surfusion*. Le physicien allemand Fahrenheit l'avait constaté avant Blagden. Celui-ci l'a mieux approfondi. Rappelons en quoi il consiste :

L'eau peut, dans certaines conditions, rester liquide au-dessous du zéro, (c'est-à-dire du point commun de fusion et congélation) ; on l'a maintenue liquide à — 12° et même à — 20°. Mais c'est là un état instable, qui cesse brusquement (non pas instantanément, comme on le dit à tort) sous les plus faibles influences. — L'une des plus remarquables, c'est l'action d'un morceau de glace, d'un cristal de glace. La plus petite parcelle de glace, introduite dans l'eau en surfusion, devient le point de départ d'une solidification qui gagne rapidement de proche en proche. Cette observation sur la cessation de la surfusion est due à Blagden.

On applique cette notion aux mesures cryoscopiques. On projette toujours quelques cristaux de glace dans la solution dont on veut déterminer le point de congélation, afin de l'empêcher de descendre au-dessous de ce point, ou, si elle y est descendue, afin de faire cesser sa surfusion.

127. Température de congélation d'une solution aqueuse. Ses deux définitions. — La loi classique de la permanence du point de congélation pendant toute la durée de l'opération, n'est pas vraie pour les solutions. M. Raoult a fait remarquer qu'elle ne s'applique qu'aux corps simples et aux composés définis parfaitement purs. Elle est un signe de la pureté des corps. Elle n'a donc rien à voir avec les dissolutions qui sont, en définitive, des mélanges de substances, et, par conséquent, des corps impurs. Pendant la durée de la congélation, la température de la solution ne reste point fixe ; elle varie et s'abaisse continuellement. On ne note donc pas, à proprement parler, *une* température de congélation.

Et ceci se comprend. Ce n'est pas *une* congélation que l'on observe ; mais une série de congélations successives se faisant à des températures décroissantes. A mesure que de nouvelles quantités d'eau se séparent, à l'état de glace, du corps en solution, la liqueur restante se concentre. On a réellement

une série de solutions de plus en plus concentrées, dont, par suite, les points de congélation deviennent de plus en plus bas.

Si une solution de concentration c_1 commence à se congeler à la température $-\theta_1$, aussitôt qu'une petite portion de glace s'est séparée, on se trouve en présence d'une autre solution plus concentrée c_2, dont le point de congélation est, par conséquent, plus bas, $-\theta_2$; dès que la congélation débute dans celle-ci, le même phénomène se reproduit, on a une nouvelle solution c_3 et un nouveau point cryoscopique, $-\theta_3$, et ainsi de suite. Il y a, en définitive, une série de solutions dont les concentrations vont en croissant de c_1 à c_2, c_3... c_n — et dont les points de congélation vont en baissant de $-\theta_1$ à $-\theta_n$. La première de ces températures, $-\theta_1$, est la seule qui corresponde à la solution vraie que l'on étudie, de concentration c_1... Les autres correspondent à des solutions de concentrations différentes et croissantes.

Il n'y a de fixe, pour une solution de concentration initiale donnée, que la température à laquelle commence la congélation et la température à laquelle elle finit. Cette dernière est ce que nous avons appelé le *point cryohydratique* (1) ; la première, c'est-à-dire la température du *début de la congéla-*

(1) Avec une solution aqueuse d'une substance quelconque, il y a deux phénomènes de solidification possibles : celle du corps dissous, celle du dissolvant. C'est tantôt l'un, tantôt l'autre de ces phénomènes qui se produit : cela dépend des circonstances (et de la loi de solubilité particulière au corps) ; il y a même une circonstance où les deux corps se déposent à la fois.

C'est le degré de concentration qui décide de l'événement. Les solutions concentrées et les solutions diluées se comportent différemment. Si l'on part d'une dissolution étendue, et qu'on la refroidisse suffisamment, elle se congélera : c'est le *dissolvant*, l'eau, qui se séparera d'abord et se déposera à l'état de cristaux en masse confuse, la glace. La solution se comporte donc comme si elle était saturée du dissolvant ; par exemple, une solution étendue de sucre que l'on refroidit, se comportera comme une solution saturée d'eau et qui la laisse déposer à l'état de cristaux. A mesure que se produit cette congélation, la concentration de la solution restante augmente le point de congélation s'abaisse et, cet état de choses se continuant, la solution passe à l'état de solution concentrée, ce qui nous amène au second cas.

Si l'on part d'une solution concentrée, l'abaissement de température aura pour conséquence, en général, un *dépôt du corps dissous* (à l'état de cristaux, si le phénomène est assez lent). En même temps, la concentration diminue, la liqueur se dilue, et, le train des choses continuant, il arrivera un moment où la solution deviendra assez étendue pour reproduire le cas précédent.

Il y a une position commune à ces deux processus. Si l'on part d'une solution étendue, elle se concentrera de plus en plus par la congélation progressive. Elle arrivera à saturation lorsque la température aura assez baissé. C'est le moment critique. A partir de là, la composition restera constante. Il se fera un dépôt, à la fois, du corps et du dissolvant mélangés précisément dans les mêmes proportions que la solution saturée, un des corps ne pouvant se déposer sans qu'une quantité équivalente de l'autre soit aussi libérée. Les choses se passent comme si cette solution, saturée à basse température, était, non pas un mélange de deux corps, mais un corps unique, une combinaison véritable d'eau et de sel qui, liquide d'abord, se solidifierait par refroidissement, en masse compacte. C'est là le *cryohydrate* de Guthrie. La température de solidification est fixe et invariable, comme pour toute substance simple. C'est le point *cryohydratique.*

Exemples : 1° Partons d'une solution de chlorure de sodium à 2 p. 100. Son point de congélation initiale est —1°,27. Si elle est soumise à un refroidissement actif et intense, la concentration de la liqueur augmentera rapidement et à — 22° elle sera de 24^{gr},3 de sel pour 100 grammes d'eau. Le mélange qui se dépose a la composition du corps qui aurait pour formule $NaCl, 10H^2O$. C'est là le prétendu *cryohydrate* de NaCl et le *point cryohydratique* est — 22° ;

2° Prenons une solution d'azotate de potasse AzO^3K saturée à la température de 15 p. 100. Elle contient environ 28 grammes de sel pour 100 d'eau. Refroidissons-la. Le sel cristallise d'abord : la concentration diminue. La température continuant à baisser arrive à — 2°,6. Alors la concentration est de 11^{gr},2 de sel pour 100 grammes d'eau. Si l'on refroidit, la liqueur se prend en masse ; c'est le *cryohydrate*, le *cryosel* qui se solidifie, le mélange de glace cristallisée avec le sel cristallisé également. Si l'on part d'une dissolution très étendue (dans laquelle on mettra un morceau de glace pour éviter la surfusion), il y aura congélation au-dessous de zéro, formation de glace jusqu'à —2°,6. A ce moment, ce sera la masse cryohydratique qui se déposera.

tion — toutes précautions étant prises contre la surfusion — fournit le *point de congélation*, le *point cryoscopique.*

Le *point cryoscopique* ou point de congélation de la solution vient d'être défini : « *la température du début de la congélation* ».

C'est là une première définition.

On peut en donner une autre, meilleure et plus avantageuse pour la pratique ; car il peut être très difficile de saisir ce début de la congélation et de le rendre fixe pendant assez longtemps pour le mesurer.

En ce qui concerne le dissolvant pur, l'eau, nous avons vu qu'on peut obtenir son point de congélation soit en plongeant le thermomètre dans la glace que l'on fait fondre en la réchauffant, soit dans l'eau que l'on fait geler en la refroidissant. En réalité, le point commun de congélation et de fusion correspond au moment où, la glace et l'eau étant mises en présence, la glace ne gèle point l'eau et où l'eau ne fond pas la glace.

Il y a un équilibre analogue en ce qui concerne la solution. Si l'on dépose un bloc de glace à la surface d'une solution refroidie qui n'est pas encore arrivée tout à fait à son point de congélation, on voit la glace disparaître, quoique la température du liquide soit inférieure à zéro. Elle se liquéfie comme elle ferait dans de l'eau au-dessus de zéro. On dit qu'elle fond : il serait plus exact de dire qu'elle se dissout. C'est le phénomène qui peut s'observer, dans la nature, lorsque des glaçons amenés par les rivières viennent fondre dans l'eau de la mer, liquide encore, quoique refroidie un peu au-dessous de zéro.

Si, au contraire, l'on dépose des cristaux de glace dans une solution abaissée au-dessous de son point de congélation, mais qui ne s'est point prise cependant en blocs solides, — qui est, ainsi qu'on le dit, en état de surfusion, — on met fin à cet état et on voit se produire en abondance des aiguilles de glace dans toute la liqueur. Ainsi, le même morceau de glace pourra avoir des fortunes contraires selon que la solution où on le place aura une température supérieure ou inférieure au point cryoscopique. Il sera fondu par la liqueur plus ou moins vite si celle-ci est plus ou moins au-dessus de son point de congélation ; la solution sera congelée par lui, si elle est au-dessous. Du moment que la glace fond avec une certaine vitesse, c'est que la température est supérieure ; du moment où elle se forme avec une certaine vitesse, c'est que la température est inférieure au point cryoscopique. Il n'y aura pas de changement dans un sens ni dans l'autre lorsqu'elle sera exactement à ce point. On conçoit que ces deux phénomènes opposés présentent une limite commune de température, où la glace ne fond pas et ne provoque pas non plus la congélation de la solution. De là découle la véritable définition du point de congélation : *c'est la température à laquelle la solution est en équilibre avec la glace.*

Quant à la *détermination exacte* de ce moment, c'est une opération très délicate lorsqu'on veut l'exécuter avec une grande précision ; lorsque, par exemple, l'on prétend répondre, comme M. Raoult, du quatre-millième ou même du millième degré.

Dans la pratique courante des laboratoires et pour les besoins de la phy-

siologie en particulier, on ne recherche pas une aussi grande précision. On emploie la méthode et l'appareil de Beckmann.

128. *Méthode usuelle des laboratoires. Appareil de Beckmann.* — L'opération consiste à refroidir le liquide très lentement et à observer la marche du thermomètre de précision qui y est plongé. Lorsqu'on approche du point de congélation, on voit l'extrémité de la colonne mercurielle descendre plus lentement. Puis, brusquement, on la voit remonter et rester stationnaire pendant plus ou moins longtemps. On note cette température. On la prend pour la température de congélation.

La raison en est simple. Tant qu'il ne se passe aucun phénomène dans la solution, elle continue à se refroidir et la colonne mercurielle thermométrique descend sans cesse; à la condition, bien entendu, qu'on ait évité toutes les causes accidentelles de réchauffement par l'action du milieu extérieur. L'élévation du thermomètre, qui interrompt cette descente, ne peut provenir que d'un phénomène producteur de chaleur se passant dans la solution. Or, la congélation, la solidification, est précisément un phénomène de ce genre, et le seul possible. L'ascension thermométrique signale donc le début de la congélation et nous savons (**127**) que la température de ce début est précisément le point cryoscopique.

La chaleur dégagée est, comme on sait, de 80,2 calories pour 1 kilogramme d'eau qui se congèle. Il faut évidemment qu'il y ait déjà une certaine quantité de glace formée pour que la chaleur dégagée ait pu compenser les causes de refroidissement. Ce n'est donc pas tout à fait le début de la congélation que l'on saisit et par conséquent il y a une erreur plus ou moins considérable sur la détermination du point de congélation. L'erreur sera d'autant moindre que la quantité de glace formée sera plus faible. La chaleur latente de solidification dégagée pourra n'être pas capable de faire remonter la colonne thermométrique si le refroidissement est trop actif, mais seulement d'arrêter un moment sa descente, ou même simplement de la ralentir. Il y a donc intérêt à ce que le réfrigérant soit à une température aussi proche que possible du point de congélation cherché.

L'appareil de Beckmann comprend une éprouvette cryoscopique S munie d'une tubulure latérale B, d'une contenance de 20 à 25 centimètres cubes au-dessous de la tubulure. On la tare. On y verse 15 à 20 grammes du liquide que l'on veut *cryoscoper* et l'on pèse. On connaît ainsi, à 1 centigramme près, le poids du liquide introduit.

On fixe dans ce tube, au moyen d'un bouchon, un thermomètre donnant le 50e de degré et un agitateur formé d'un fil de platine recourbé qui traverse également le bouchon et n'est pas représenté sur la figure. L'éprouvette cryoscopique étant ainsi équipée, on la fixe elle-même au moyen d'un bouchon dans une éprouvette plus large M, qui forme simplement autour d'elle un matelas d'air destiné à ralentir et à modérer l'action du milieu réfrigérant.

Ce liquide réfrigérant est alors versé dans le vase extérieur L. Il doit être choisi de manière que la température soit seulement de 2 à 3 degrés inférieure au point de congélation cherché. S'il s'agit d'opérer sur une solution aqueuse, on emploie un mélange de glace et de sel en proportions convenables pour obtenir un froid qui oscille autour de — 3 degrés.

On agite le liquide constamment. On observe attentivement le thermomètre et on note le relèvement qui se produit, à un moment donné, dans sa marche descendante. On a la température de congélation cherchée.

On retire l'appareil du bain réfrigérant, — on le laisse se réchauffer légèrement, — puis on répète l'opération. On prend la moyenne.

La seconde partie de l'opération consiste à renouveler la série des manipulations précédentes, après avoir introduit, par le tube latéral B, un certain point déterminé du corps dont on veut étudier la solution, et on recommence à manœuvrer comme tout à l'heure.

La différence de résultats de ces deux épreuves successives donne l'abaissement du point de congélation de la solution.

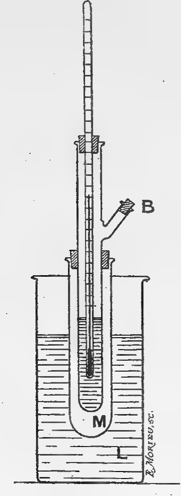


Fig. 447.

129. *Cryoscopie de précision.* — Dans la plupart des cas, une plus grande précision est nécessaire.

Les températures de congélation sont, en effet, très voisines les unes des autres, au moins lorsqu'il s'agit des solutions salines étendues : elles sont alors comprises généralement entre 0° et 3° au-dessous de zéro. Des variations assez considérables de concentration ne peuvent donc se traduire que par des différences cryoscopiques assez faibles. En conséquence, il faut compenser, par la sûreté et la sensibilité des mesures, la faiblesse des écarts et, par suite, la possibilité des erreurs. C'est à des erreurs de ce genre que les contradicteurs des théories nouvelles attribuent l'apparente proportionnalité entre les abaissements de congélation et les concentrations, c'est-à-dire la loide Blagden.

Il y a d'autres circonstances dans lesquelles cette extrême précision est de rigueur : par exemple lorsqu'on étudie l'influence de la pression sur le point cryoscopique. Une pression d'une atmosphère, c'est-à-dire de 1033 grammes par centimètre carré n'abaisse, en effet, le point de congélation que de 0°,007.

Les expérimentateurs se sont appliqués, surtout en ces dernières années, à perfectionner les appareils cryoscopiques et à approfondir les plus petites circonstances qui peuvent influer sur le phénomène. Un physicien soigneux et perspicace, M. Ponsot, s'est distingué, à côté de M. Raoult, dans la discussion des conditions expérimentales et dans la réalisation des perfectionnements de la méthode et des appareils.

Les méthodes précises sont fondées sur l'établissement de ce que M. Ponsot appelle un *régime permanent*. Supposons que l'on ait une solution refroidie, dans laquelle nagent des paillettes de glace que l'agitation disperse dans tout le liquide.

Le point de congélation est atteint au moment où il y a équilibre entre la glace et la solution, où la glace ne fond pas, où la solution ne se congèle point. Il n'y a pas de changement d'état; donc ni absorption de chaleur, ni dégagement de chaleur, de cause interne. Le thermomètre plongé dans la solution reste invariable. Il en donne le point cryoscopique. Et si les causes externes d'échauffement et de refroidissement se compensaient exactement à ce moment, ce qui est l'idéal à atteindre, cet état se maintiendrait : le régime resterait permanent, d'une façon indéfinie.

Mais cette compensation vigoureuse des causes d'échauffement et de refroidissement (abstraction faite de celles qui sont dues aux changements d'état) ne persiste jamais bien longtemps. En fait, on n'observe de permanence du régime (jugé par la fixité du thermomètre) que pendant des périodes assez courtes.

Il ne suffit pas qu'il y ait un *régime permanent* pour que la température correspondante puisse être considérée comme le point de congélation de la solution existant à ce moment-là ; il faut encore que ce régime permanent soit dû à l'équilibre de l'eau et de la glace. Le refroidissement est la somme des effets dus au voisinage ou au contact médiat du mélange réfrigérant et à la fusion de la glace formée, si elle se produit ; le réchauffement est dû à la chaleur de l'air ambiant qui se communique, par l'ouverture de l'éprouvette, à celle que produit l'agitation et enfin à celle que dégage la congélation de l'eau, si elle a lieu. On conçoit que les deux sommes puissent se balancer, sans que les deux derniers termes se balancent, à savoir fusion de la glace, congélation de l'eau. Par conséquent, le régime permanent n'implique pas forcément l'équilibre de l'eau et de la glace, et sa température n'est pas nécessairement le *point cryoscopique*. Mais elle approche d'autant plus de l'être, que la compensation est mieux assurée entre les autres termes : c'est-à-dire, d'autant plus que la chaleur communiquée par l'air et l'agitation balance plus exactement celle qui est enlevée par le réfrigérant.

Le meilleur moyen de réaliser l'égalité de ces deux ordres de facteurs, c'est d'en réduire autant que possible la grandeur. Si le milieu réfrigérant était exactement et fixement à la température de congélation ou seulement à quelques millièmes de degré de ce point, c'est-à-dire s'il ne refroidissait pas l'éprouvette cryoscopique ; si, d'autre part, la température n'agissait que d'une manière insignifiante pour la réchauffer, l'inconvénient de l'inégalité de ces deux facteurs serait réduite à son minimum.

C'est là ce que l'on essaie d'obtenir, en réglant exactement la température du réfrigérant au plus près du point de congélation ; en prenant toutes les précautions pour écarter les pertes par rayonnement ou convection de l'éprouvette cryoscopique ; et, pour éviter les gains, en la protégeant contre tout contact avec l'atmosphère ambiante. Incidemment, en poursuivant cet avantage, on en obtient un autre, qui est de mieux assurer l'unité de température du liquide dans toutes les parties, unité qui serait impossible si la surface rayonnait fortement.

Il faut ajouter à ces précautions les suivantes : 1° une agitation qui mélange les diverses parties de la solution, de manière que le thermomètre indique bien la température uniforme de la masse liquide, et non pas la température locale d'un de ses points ; agitation qui devra être modérée pour ne pas engendrer une chaleur de frottement trop considérable. D'ailleurs, la mesure de la température du thermomètre lui-même serait faussée par des mouvements violents du liquide ; 2° le dépôt, dans la liqueur, de morceaux de glace pour empêcher la surfusion, ou l'emploi d'une véritable gaine de glace, qui a le même effet. On se trouve placé ainsi dans les meilleures conditions pour la détermination du point cryoscopique.

En fermant l'éprouvette cryoscopique, en adaptant un agitateur rotatif distinct du thermomètre, en agitant juste ce qui est nécessaire pour que les paillettes de glace soient distribuées dans toute la solution, on remarquera que la température de la solution et celle du réfrigérant seront très peu différentes (quelques millièmes de degré) ; on aura réalisé les conditions d'un équilibre

aussi voisin que possible de l'équilibre théorique où les corps sont en repos ; le rayonnement sera presque nul.

130. *Des deux méthodes employées en cryoscopie.* — A. Méthode de congélation après surfusion. — B. Méthode avec gaine de glace. — C. Réfrigérants.

Il faut d'abord remarquer, qu'étant donnée une solution déterminée, ce n'est ordinairement pas de celle-là même que la cryoscopie de précision donnera le point cryoscopique : c'est d'une autre, de concentration plus ou moins voisine, qui remplit l'éprouvette au moment de la mesure. Il n'y a donc que deux alternatives. La première, c'est de faire en sorte que cette solution soit aussi voisine que possible de celle que l'on veut cryoscoper, de manière que la surfusion soit nulle. On essaye tout au moins de la réduire, en répétant l'expérience plusieurs fois, de manière que la solution définitive soit infiniment près de la solution initiale.

La seconde, c'est de tenir compte de la différence de concentration des deux solutions : de déduire le point de congélation de la première du point de congélation de la seconde. On y parvient de diverses manières et d'abord par le calcul. On suppose, que la loi de Blagden est applicable dans le cas de solutions si voisines, et que les abaissements de congélation, dans les deux conditions, sont proportionnels aux concentrations. La concentration de la solution qui remplit l'éprouvette au moment de la mesure, s'obtient en décantant rapidement la partie liquide de la solution aussitôt que l'on a lu la température, et en déterminant par l'analyse directe sa composition, ou bien, en la déduisant, indirectement, de la mesure d'une grandeur physique caractérisant cette solution (la densité, par exemple).

On emploie deux méthodes, la méthode de congélation après surfusion, et la méthode de congélation avec gaine de glace.

— A. Méthode usuelle ou de congélation après surfusion. — On abaisse suffisamment la température de la solution donnée pour qu'il y ait surfusion ; le contact d'un morceau de glace produit la formation de nombreuses paillettes que l'agitation disperse dans toute la solution, la température monte, atteint un maximum. Le régime est permanent pendant un certain temps. Le point maximum où s'est arrêté le thermomètre représente le point de congélation, non pas de la solution initiale, mais de celle qui remplit l'éprouvette cryoscopique à ce moment, et dont la concentration est voisine de la concentration primitive. Du point cryoscopique observé, on déduit, comme nous l'avons dit, le point cryoscopique cherché.

— B. Méthode avec gaine de glace. — On se propose plutôt, dans cette méthode, de trouver une solution ayant un point de congélation fixé à l'avance. On en déduit le point de congélation de toute autre solution de concentration voisine.

On forme une solution de concentration assez grande ; on la porte à la température choisie, ou à une température un peu inférieure à celle-là ; on y ajoute des aiguilles de glace jusqu'à ce que celles-ci persistent en assez grande quantité dans la solution : cette glace a été obtenue avec de l'eau pure.

Dans l'éprouvette cryoscopique, on produit une gaine de glace pure compacte, de 1 millimètre d'épaisseur environ, par le refroidissement rapide d'eau pure ; on rejette ensuite l'excès d'eau qu'on remplace par la solution préparée précédemment, et on porte l'éprouvette dans l'appareil cryoscopique. Le réfrigérant est à une température telle que le régime permanent doit être établi au bout de quelques instants.

Le rayonnement est, pratiquement, nul. L'agitation est réduite au minimum, si bien qu'on peut la cesser pendant quelques minutes, puis la rétablir, sans constater la moindre variation de température. Cela, à la condition d'avoir un réfrigérant à température invariable et une éprouvette complètement soustraite à tout réchauffement par sa partie supérieure.

On sait que la glace se formant dans la solution ne se présente pas toujours sous le même aspect ; si elle s'agglomère, elle emprisonne de la solution ; et il n'est pas certain qu'elle soit absolument pure.

Dans la méthode qu'on vient d'exposer, ces causes d'erreur sont supprimées : cette méthode est donc supérieure à la précédente comme précision, mais, il faut de toute nécessité déterminer expérimentalement la concentration de la partie restée liquide.

— C. Réfrigérants. — Il y a deux manières d'obtenir un réfrigérant à température donnée et à peu près fixe : en employant de la glace en présence d'une solution de sel marin, ou bien en évaporant un liquide volatil, tel que l'éther, le sulfure de carbone, etc.

a. — On casse la glace en morceaux de la grosseur d'une noix, on met ces morceaux en présence d'une solution de chlorure de sodium d'autant plus concentrée qu'on veut obtenir une température plus basse ; on agite fortement, la température s'abaisse jusqu'à une valeur minima. Est-elle trop basse, on ajoute de l'eau jusqu'à ce qu'on ait obtenu la température voulue ; dans le cas contraire, on ajoute une solution saturée de sel marin.

Pour maintenir ensuite une température très peu variable, on agite constamment, on remplace les morceaux de glace fondus par d'autres, et, aussitôt que la température s'élève, on ajoute une petite quantité de solution saturée.

b. — On produit du froid par évaporation de l'éther ou du sulfure de carbone qu'on fait traverser par un léger courant d'air *sec*. Pour maintenir à peu près constante la température, il suffit de régler la vitesse du courant d'air. Toutefois ce réglage est très délicat : on doit intervenir de temps à autre. En réalité, la température subit des oscillations autour de la température qu'on se propose de maintenir constante.

Pour éviter ces oscillations et avoir une constance de température remarquable au millième de degré, on pourrait employer une solution dont le point cryohydratique soit la température fixe qu'on veut obtenir, refroidir cette solution et la faire congeler en utilisant l'un des deux moyens précédents.

131. *Appareils de précision. — Appareil de Raoult. — Appareil de Ponsot.* — Les appareils qui sont en usage pour les déterminations cryoscopiques de grande précision sont ceux de Raoult et de Ponsot (fig. 448 et 449). Nous donnons ici une figure de l'appareil de Raoult. On trouvera

dans le mémoire (1) de cet auteur la description et l'usage de cet appareil.
M. Raoult utilise, pour refroidir l'appareil, l'évaporation de l'éther traversé

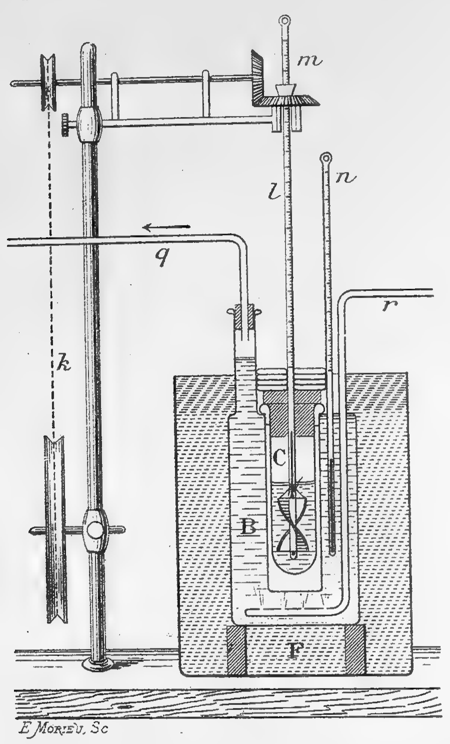


Fig. 448. — Appareil cryoscopique de Raoult. — Le réfrigérant B (25 centimètres sur 15 centimètres) est un seau en verre dont le couvercle, en cuivre, porte un moufle de cuivre : il est rempli d'éther, traversé par un courant d'air sec. L'air entre par le tube *r* et sort par les trous de la partie horizontale du tube roulée en cercle, au-dessous et autour du moufle; il s'échappe en *q* par aspiration au moyen d'une trompe. — Le réfrigérant est entouré d'une couche de substances isolantes, représentées en F. — L'éprouvette cryoscopique C est une éprouvette à gaz à bords évasés (170 millimètres sur 45 millimètres); son bouchon est traversé par le thermomètre de précision *l*. Au réservoir de celui-ci est fixé un agitateur rotatif formé d'une hélice en toile de platine. Le thermomètre est fixé à une petite roue dentée horizontale, mise en mouvement par une roue d'angle, recevant elle-même son mouvement d'une petite turbine.

par un courant d'air dont on règle la vitesse. On peut aussi le réchauffer en faisant arriver par le même tube, non plus de l'air, mais de l'éther à la température de la salle. On s'arrange ainsi pour amener la température du réfrigérant à un dixième de degré au-dessous de la température de congélation de la dissolution, connue approximativement par une expérience antérieure; on maintient cette température constante, à 2 ou 3 centièmes de degré, jusqu'à la fin de l'opération. A un moment donné, le thermomètre de l'éprouvette cryoscopique où l'on a introduit une parcelle de glace, remonte, indiquant le fait de la congélation. Cinq minutes après, on fait une lecture : on

(1) F.-M. Raoult, Cryoscopie de précision (*Annales de l'Université de Grenoble*, t. X, n° 3. Grenoble, 1899).

la répète de deux en deux minutes pendant un quart d'heure au moins. Ces lectures doivent fournir des nombres identiques à 2 ou 3 millièmes de degré près. La moyenne donne le point de congélation de la dissolution qui, à ce moment, est liquide dans l'éprouvette, car il y a alors équilibre de température entre ce liquide et la glace qui y existe.

L'appareil de Ponsot, tel qu'il a été en usage au Laboratoire de physiologie

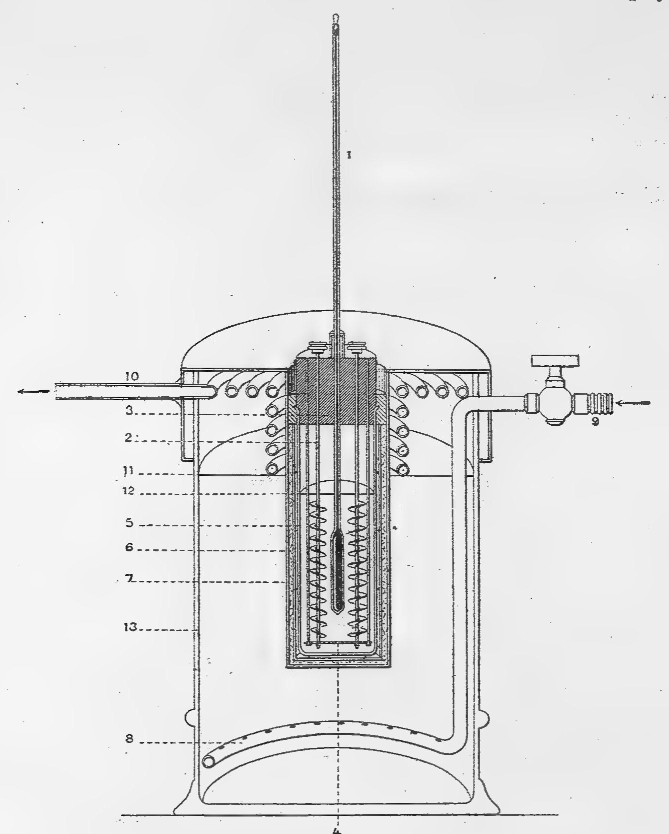


Fig. 449. — Cryoscope de précision de Ponsot. — 1, thermomètre suspendu à l'aide d'un anneau de caoutchouc au-dessus du couvercle d'ébonite ; 2, agitateurs-spirale en platine, mis en mouvement à l'aide de poulies à gorge; 3, bouchon d'ébonite traversé par le thermomètre et par l'axe de chaque agitateur rotatif ; 4, cadre rectangulaire fixé au bouchon d'ébonite et traversé, en bas, par l'axe de chaque agitateur ; 5, éprouvette cryoscopique ; 6, manchon de feutre doublé à la surface interne d'une lame de laiton poli ; 7, cylindre métallique solidement fixé au couvercle de l'appareil et fermé en bas ; 8, tube de laiton percé de trous par lesquels l'air s'échappe en bulles dans le liquide réfrigérant ; 9, tube d'entrée de l'air ; 10, tube de sortie de l'air formant spirale sous le couvercle de l'appareil ; 11, niveau du liquide réfrigérant ; 12, niveau de la solution ; 13, vase qui contient le réfrigérant.

de la Sorbonne, n'est qu'une forme améliorée du premier. En voici la description :

On peut employer l'un ou l'autre des deux moyens de réfrigération dont il vient d'être question.

Le corps réfrigérant est contenu dans un vase cylindrique (13) entouré de substances aussi isolantes que possible (feutre, plume, etc.) et fermé par un couvercle également protégé contre la chaleur extérieure. Au centre de ce couvercle est solidement fixé un cylindre creux métallique (7) dont la plus grande partie est au contact du corps réfrigérant. C'est dans ce cylindre qu'on place l'éprouvette cryoscopique (5).

A cause des oscillations de température du réfrigérant, ce cylindre est garni intérieurement d'une couche de feutre, revêtue d'une feuille de clinquant dont la surface, du côté de l'éprouvette, est polie et miroitante. L'éprouvette n'est pas en contact avec cette feuille de clinquant, excepté, cependant, en quelques points repoussés intentionnellement : elle ne reçoit pas de chaleur par conductibilité et se trouve suffisamment fixée.

Cette éprouvette doit être en verre aussi mince que possible. Un cylindre d'ébonite (3) entrant dans le cylindre métallique la ferme à sa partie supérieure. Ce cylindre est traversé par le thermomètre (1). L'agitateur (2) y est fixé. Tout agitateur oscillant vertical dont la tige s'élève ou s'abaisse doit être proscrit. On utilise un agitateur rotatif actionné par un petit moteur placé à proximité de l'opérateur lorsqu'il observe le thermomètre. La lecture de la température se fait avec un viseur disposé à quelques décimètres de l'appareil cryoscopique.

132. *Marche d'une détermination.* — α. Point de congélation de la solution. — β. De l'eau pure. — γ. Abaissement correspondant a la solution primitive.

α. Nous indiquerons maintenant la manière de conduire une détermination cryoscopique avec cet appareil, en employant la méthode de congélation après surfusion (1). Elle exige, en outre du réfrigérant de l'appareil cryoscopique, un autre réfrigérant spécial, formé de glace et d'une solution de sel marin. La recherche s'exécute en deux temps :

1° *Expérience préliminaire.* — On fait une expérience préliminaire; puis l'épreuve définitive, d'abord avec la solution, ensuite avec l'eau pure.

La solution donnée est versée dans l'éprouvette cryoscopique, qu'on place dans le réfrigérant spécial formé de glace et d'une solution de sel marin; on l'agite fortement. De temps en temps on enfonce l'éprouvette assez profondément pour que la surface libre de la solution soit au-dessous de la surface libre du réfrigérant extérieur.

Le thermomètre plongé dans la solution baisse de plus en plus, la vitesse d'abaissement se ralentit et devient très faible, la liqueur est en surfusion : on note la température minima. Puis, brusquement, la congélation se fait, la chaleur latente de solidification fait remonter la température jusqu'à un maximum que l'on détermine. La différence entre la température minima de tout à l'heure et la température maxima actuelle mesure le degré de surfusion. Il faut s'arranger de manière que cette différence et, par suite, la surfusion, soit faible.

2° *Expérience définitive.* — Telle est la première partie de la manœuvre. Voici maintenant la seconde :

Le réfrigérant de l'appareil cryoscopique est porté à une température très peu inférieure au maximum.

La glace de la solution fond. Quand cette fusion a eu le temps de s'achever ou d'être poussée plus ou moins loin, on refroidit de nouveau la solution, en plongeant, une seconde fois, l'éprouvette cryoscopique dans le

(1) Nous ne donnons pas le tableau d'une détermination au moyen de la seconde méthode : emploi de la gaine de glace. Nous renvoyons au travail de M. Ponsot (A. Ponsot, *Recherches sur la congélation des solutions salines étendues*. Gauthier-Villars, 1896).

réfrigérant spécial. Et c'est pour qu'elle en puisse prendre rapidement la température qu'on a eu soin de loger cette éprouvette dans un cylindre de laiton très mince.

On ne va pas cette fois si loin que la première fois. Quand on est arrivé à environ 0°,5 au-dessous du maximum observé précédemment, on arrête l'opération. On ajoute à la solution une parcelle de glace qui va faire cesser la surfusion et déterminer la congélation. Mais le phénomène se produit assez lentement pour que l'on ait le temps d'exécuter les manœuvres suivantes sans se presser, surtout si la température ambiante est basse et voisine de zéro.

On prend donc le temps de tirer l'éprouvette cryoscopique du cylindre de laiton et de la porter dans l'appareil cryoscopique. — Pendant le transport, la congélation s'est accomplie en grande partie. L'éprouvette étant mise en place, on actionne l'agitateur rotatif en même temps qu'on suit la marche ascendante de la température. Au bout de quelques minutes (cinq en moyenne), on observera une température qui restera absolument invariable si l'on a bien réalisé les conditions de régime permanent. On s'en assurera en continuant l'observation de la température pendant au moins un quart d'heure si le thermomètre apprécie le millième de degré et si la solution est concentrée ; pendant plus longtemps, si le thermomètre est moins sensible et la solution moins concentrée. On a ainsi le point cryoscopique.

Si, au lieu de se maintenir stationnaire, la température varie, l'opération n'est plus valable. Si par exemple la température commence à baisser, c'est que l'action du réfrigérant est prépondérante ; on s'éloigne de l'équilibre : le point cryoscopique, déterminé tout à l'heure, est trop bas ; — si elle s'élève, il est trop haut. Il faut alors recommencer l'expérience en changeant l'une des conditions fondamentales. On élèvera un peu la température du réfrigérant cryoscopique, si la température a baissé ; et inversement.

Il ne faut pas s'imaginer que des mesures comparatives mettent à l'abri de l'erreur. En opérant de la même manière, d'abord avec l'eau pure pour déterminer la température de congélation, c'est-à-dire le zéro ; puis avec la solution pour en avoir aussi le point cryoscopique, on a pu croire que les erreurs disparaîtraient en faisant la différence pour obtenir l'abaissement. Cette opinion n'est pas fondée.

Il faut donc se mettre dans des conditions telles, c'est-à-dire régler de telle façon la température du réfrigérant cryoscopique, que l'on obtienne l'état stationnaire, le régime permanent. — Lorsqu'on l'a obtenu, on note non seulement la température de congélation, mais toutes les circonstances de l'expérience qui pourront renseigner pour des expériences ultérieures, par exemple la température de l'air, la vitesse de rotation de l'agitateur, la température du réfrigérant et même la pression atmosphérique, si la sensibilité du thermomètre est très grande (plus grande que le $\frac{1}{1000}$ de degré).

β. *Point cryoscopique de l'eau pure.* — On opère de la même manière qu'avec la solution. Seulement, ici, l'expérience préliminaire est inutile,

parce que l'on connaît à peu près la position du zéro du thermomètre On arrive, par l'expérience définitive, à la connaître exactement. On sait à quelle division du thermomètre de précision que l'on emploie correspond le zéro et, si l'on connaît la valeur des divisions de ce thermomètre en degrés centigrades, on connaît, par suite, en valeur absolue l'abaissement correspondant à la solution : soit Δ.

γ. *Abaissement correspondant à la solution primitive.* — On détermine expérimentalement la concentration de la solution au moment où l'on a fixé la mesure du point de congélation, en recueillant sans retard le liquide et en l'analysant (1). Soit c cette concentration, répondant à l'abaissement Δ.

De là on peut déduire l'abaissement relatif à toute autre solution de concentration voisine, et particulièrement l'abaissement Δ_1 répondant à la solution primitive de concentration c_1. On applique, pour cela, comme nous l'avons dit, deux moyens :

1° *Le calcul.* — On suppose exacte la loi de Blagden, qui n'est pas rigoureuse, en général, mais qui l'est très approximativement quand il s'agit de solutions si voisines comme concentration. Les abaissements sont proportionnels aux concentrations. On a $\frac{\Delta_1}{c_1} = \frac{\Delta}{c}$.

2° *La répétition des observations.* — On réitère la détermination, en abaissant plus ou moins la température du réfrigérant cryoscopique, c'est-à-dire en faisant varier la surfusion. On observe les points de congélation correspondants, et par conséquent les abaissements. On trace la courbe qui relie ces valeurs. Cette construction graphique permet de trouver l'abaissement correspondant à la solution primitive, c'est-à-dire qui serait donné par une expérience dans laquelle on aurait exactement abaissé la température au point cryoscopique, sans surfusion; ou, comme l'on dit d'une manière abrégée, l'abaissement répondant à une surfusion nulle.

Les résultats numériques étant maintenant obtenus ou possibles à obtenir,

(1) On pourrait aussi peser la glace formée dans la congélation, soit e.

Il y a une relation théorique entre la quantité d'eau congelée e et les constantes caractéristiques de la solution. On a

$$e = \frac{(CP + m)d}{79{,}5 - \frac{\Delta}{2} - D}$$

dans laquelle C est la chaleur spécifique de la solution ; P le poids de solution employé ; m la masse, en eau, des corps dont la température est élevée avec celle de la solution, quand la surfusion cesse ; d la valeur de la surfusion ; Δ l'abaissement cryoscopique de la solution ; D la chaleur de dilution de la solution par l'eau. La chaleur spécifique C est quelquefois donnée par les tables. Au cas contraire, si on la suppose égale à celle de l'eau pure $C = 1$ et si l'on néglige D, la formule donne la valeur de e avec une approximation suffisante pour les solutions étendues, mais qui devient insuffisante pour les solutions concentrées.

Connaissant le poids de glace formé e dans l'opération qui a fourni l'abaissement Δ de la solution de concentration c, on peut avoir l'abaissement Δ_1, correspondant à la solution primitive de concentration c_1.

On a, en effet, d'après la loi de Blagden, $\frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{c_1}{c}$, c'est-à-dire $\frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{P - e}{P}$.

il faut voir comment ils varient avec les conditions de l'expérience, c'est-à-dire chercher les relations qui lient l'abaissement de congélation à la concentration, à la pression extérieure, et surtout, point infiniment plus important, à la nature chimique des deux corps, dissous et dissolvant.

Nous dirons d'abord deux mots seulement de la relation qui lie l'abaissement de congélation d'une solution à la pression.

133. *Limite de précision de la cryoscopie.* — Les mesures cryoscopiques, ainsi conduites, peuvent atteindre un haut degré de précision. M. Raoult conclut en ces termes son étude sur la cryoscopie de précision :

« Il résulte de cette longue étude qu'avec l'appareil ci-dessus décrit, et en observant les règles indiquées, il est assez facile d'obtenir les abaissements du point de congélation des solutions aqueuses étendues avec une approximation de 0°,001.

« Il est fort difficile d'aller plus loin, surtout à cause des variations accidentelles du zéro ; mais, si l'on a la bonne fortune de disposer d'un thermomètre où les variations soient faibles et régulières, on peut espérer atteindre une approximation allant jusqu'à 0°,0002. »

C'est l'abaissement que M. Raoult a obtenu dans ses expériences relatives à l'abaissement moléculaire de l'oxygène.

134. *Influence de la pression sur le point de congélation d'une solution.* — La pression a une influence sur la solidification des liquides, comme elle a une influence sur le point de liquéfaction, et en général sur tous les changements d'état. La valeur du point de congélation, et par conséquent l'abaissement de congélation, dépend de la pression. Il faudrait donc, lorsque l'on parle de la grandeur de cet abaissement, préciser la pression à laquelle il a été obtenu, ou plutôt le ramener à la pression normale. Mais, en fait, les variations de la pression, dans les conditions ordinaires, sont trop faibles pour exercer une influence appréciable sur la valeur de l'abaissement cryoscopique, et on les néglige. Rigoureusement parlant, l'influence de la pression est pourtant loin d'être nulle, sur le point de congélation de l'eau, et sur le point de congélation des solutions.

Imaginons une masse d'eau pure qui serait exactement à son point de congélation, sous une pression extérieure donnée. Un morceau de glace placé sur cette eau pure serait en équilibre avec elle, d'après la définition même du point de congélation, il n'augmenterait, ni ne diminuerait ; il n'y aurait ni fusion de la glace ni congélation de l'eau.

Augmentons la pression ; une partie de la glace fond aussitôt. Pour empêcher cette fusion et maintenir l'équilibre, il aurait fallu, en même temps qu'on augmentait la pression, abaisser la température :

Le point de congélation de l'eau pure s'abaisse quand on augmente la pression.

On a trouvé qu'un accroissement de pression de 1 atmosphère abaissait le point de congélation de l'eau pure d'environ 0°,007.

La même chose est vraie pour les solutions. Si une parcelle de glace est

en équilibre avec une solution à une température et à une pression données, elle fond si on augmente la pression; on provoque la congélation si on diminue la pression. On peut donc dire aussi :

Le point de congélation d'une solution s'abaisse quand on augmente la pression.

Quant à la grandeur de l'abaissement, dans ce cas, on peut admettre que pour les solutions diluées il est le même que pour l'eau elle-même, c'est-à-dire qu'il est de 0°,007 pour un accroissement de pression d'une atmosphère : mais, plus la concentration de la solution augmente, plus la relation entre la variation de pression et la variation du point de congélation s'éloigne de cette règle simple.

Remarquons que si une parcelle de glace est en équilibre à la surface d'une solution, elle fond si on l'enfonce dans la solution ; il suffirait toutefois d'un abaissement d'environ 0°,0001 pour empêcher cette fusion à une profondeur de 10 centimètres. Dans une solution suffisamment agitée pour que toutes ses parties soient à la même température et possèdent la même concentration, deux morceaux de glace à des profondeurs différentes ne peuvent être simultanément en équilibre avec la solution ; le point de congélation correspond à la pression moyenne.

135. L'abaissement du point de congélation (solidification) des solutions est un fait universel. — *Méthode de la congélation fractionnée.* — Jusqu'à M. Raoult, le phénomène du retard à la congélation n'avait été étudié que pour les solutions aqueuses des sels. C'est à cette espèce de solution, qui, comme nous l'avons dit, sont des pseudo-solutions, que s'étaient restreintes les études de Blagden, Despretz, Dufour, Rüdorf et de Coppet. M. Raoult a porté son attention sur le groupe considérable des matières organiques. Les solutions aqueuses des matières organiques, telles par exemple que les solutions sucrées, sont des solutions véritables, c'est-à-dire telles que le phénomène de dissolution ne s'y complique pas d'autre chose comme de combinaison, de dissociation.

Outre l'eau, Raoult a employé comme dissolvants les acides formique et acétique, le bromure d'éthylène, la benzine, la nitrobenzine, le phénol, le thymol, la naphtaline ; et comme corps dissous plus de 200 substances diverses.

Une étude, ainsi étendue, a permis des conclusions très générales. La première de ces conclusions ou de ces lois, c'est que l'abaissement du point de congélation est un fait universel. Il s'observe même lorsqu'on emploie comme dissolvants des corps en fusion ; par exemple du nitrate de potasse, dans lequel on dissout du nitrate de soude, ou inversement, — du plomb fondu où l'on fait dissoudre de petites quantités de zinc, d'étain, d'antimoine, de cuivre ou d'argent, — de l'étain fondu où l'on dissout un métal quelconque. Dans tous ces cas, l'addition du corps capable de se dissoudre a pour effet d'abaisser le point de solidification du dissolvant.

La partie qui se solidifie en premier lieu n'est pas un mélange des corps présents dans la solution ; c'est le dissolvant pur et seul. De là, un procédé de purification, maintenant bien connu des chimistes sous le nom de

Méthode de la congélation fractionnée. Elle consiste à soumettre à un refroidissement lent et méthodique le produit impur qui tient en solution des corps étrangers, et à en faire sortir par congélation le dissolvant. C'est ainsi que l'on peut se procurer l'acide acétique chimiquement pur ou acide acétique glacial : on obtient de même la benzine à l'état de pureté.

Les plus simples observations ont montré que la quantité de matière en dissolution exerce une influence sur l'abaissement du point de congélation de la solution. Plus la quantité du corps étranger augmente, plus s'abaisse le point de congélation. Mais lorsqu'il s'est agi de préciser la nature exacte de la relation entre l'abaissement et la concentration, il a fallu des déterminations plus précises. C'est Blagden qui les exécuta en 1784. Il conclut à la proportionnalité.

La loi de Blagden [qui n'est, pour beaucoup de physiciens, qu'une grossière approximation — vraie à $\frac{1}{100}$ près dans le cas des solutions étendues] a donc permis de comparer, au point de vue cryoscopique, les solutions de même nature prises à des concentrations différentes.

Mais, quand on passe d'une solution à une autre de nature différente, il ne semblait plus y avoir de relation entre leurs abaissements cryoscopiques. La liaison de ces grandeurs échappait.

— La considération des effets moléculaires a permis d'apercevoir cette relation. De Coppet, et plus tard Raoult, en introduisant la notion de *concentration moléculaire* au lieu de *concentration en grammes*, ont subitement éclairé la question. Le résultat de cette substitution a été de faire apparaître cette vérité que *l'action exercée par la substance dissoute sur la congélation du dissolvant est une fonction moléculaire.*

On retrouve en cryoscopie, comme cela s'est déjà vu dans d'autres chapitres de la physique, l'importance du procédé de notation. Les mêmes faits, selon qu'on les traduit sous telle ou telle forme, cachent ou au contraire manifestent les relations qu'ils ont entre eux.

Il ne faut donc pas s'étonner de la variété des formes et par conséquent des formules que l'on a employées pour exprimer les résultats cryoscopiques.

136. Diverses formes données à l'abaissement cryoscopique : Coefficient d'abaissement $\frac{\Delta}{c}$. Abaissement moléculaire $\frac{\Delta}{n}$. — Abaissement produit par une molécule dans 100 du dissolvant. — Soit une solution contenant p grammes de corps dissous dans P grammes de dissolvant (eau). Dans 1 gramme de dissolvant il y aura $\frac{p}{P}$ de corps dissous : dans 100 grammes de dissolvant, il y aura $\frac{p}{P} \times 100$ grammes de corps dissous. C'est ce que l'on nomme la concentration c.

$$c = \frac{p}{P} \times 100 \qquad (1)$$

Cryoscopons cette solution de concentration c, c'est-à-dire contenant c grammes du corps dans 100 grammes du dissolvant (eau).

Le dissolvant pur se congèle à t_0 ; le point de congélation de la solution est t_1 : l'abaissement de congélation est $\Delta = t_1 - t_0$.

Coefficient d'abaissement. — On a introduit, en cryoscopie, une notion qu'il faut indiquer ; c'est celle du *coefficient d'abaissement*. On appelle ainsi l'abaissement produit par une certaine solution déterminée, celle qui contient 1 gramme de la substance pour 100 du dissolvant (eau), c'est-à-dire l'*abaissement produit par la solution de concentration égale à 1*.

On peut l'exprimer en fonction de l'abaissement de la solution de concentration c. On supposera que l'abaissement cryoscopique est proportionnel à la concentration (loi de Blagden) et l'on dira que si Δ est l'abaissement correspondant à c grammes dans 100 d'eau, $\frac{\Delta}{c}$ sera celui qui correspondra à 1 gramme. Ce sera le *coefficient d'abaissement* A.

$$A = \frac{\Delta}{c} = \frac{P}{p \times 100} \Delta. \qquad (2)$$

Abaissement moléculaire. — En second lieu, on considère aussi l'abaissement produit par une molécule dissoute dans 100 grammes du dissolvant. Rapportons, toujours en supposant la loi de Blagden — l'effet observé à la molécule du corps dissous. Demandons-nous quel sera l'abaissement produit par le poids moléculaire m de la substance, dissous dans 100 grammes d'eau. Considérons en d'autres termes la solution de *concentration moléculaire*. L'abaissement, qui était $\frac{\Delta}{c}$ pour 1 gramme dans 100 d'eau, sera m fois plus grand pour m grammes. On aura $\Delta_m = m . \frac{\Delta}{c}$.

L'abaissement produit par une molécule dans 100 grammes est donc :

$$\Delta_m = m . \frac{\Delta}{c} \text{ ou } m . \Delta . \frac{p}{P} \times 100 \qquad (3)$$

m étant le poids moléculaire du corps dissous ; Δ l'abaissement cryoscopique de la solution contenant p grammes du corps dissous dans P grammes du dissolvant ou contenant $\left(\frac{p}{P} \times 100 = c \text{ grammes}\right)$ dans 100 grammes d'eau.

L'avantage de cette notation est d'introduire la considération du nombre des molécules. Soit n le nombre de molécules du corps dissous, dans la solution de concentration c. Chaque molécule pesant m, les n molécules pèseront $m \times n$ et l'on aura : $c = m \times n$.

D'autre part, soit N le nombre des molécules contenues dans 100 grammes du dissolvant (eau) et M son poids moléculaire. On aura 100 grammes $= M \times N$.

L'abaissement moléculaire est donc :

$$\Delta_m = \Delta.\frac{m}{c} \text{ ou } \frac{\Delta}{n} \text{ ou } \Delta m.\frac{p}{P} \times 100 \text{ gr.}$$

ou, en remplaçant 100 grammes par M × N,

$$\Delta_m = \Delta.m.\frac{p}{P}.\text{ M.N.}$$

Abaissement produit par une molécule du corps dissoute dans 100 molécules du dissolvant. — Considérons enfin la solution qui contiendrait 1 molécule du corps dissoute dans 100 molécules — et non plus dans 100 grammes du dissolvant.

$\frac{\Delta}{n}$ est l'abaissement produit par 1 molécule dans N molécules de dissolvant ; il sera N fois plus grand, parce que la concentration sera elle-même N fois plus grande, si la solution a lieu dans 1 molécule, et sera donc $\frac{\Delta}{n}$ N ; et si la solution se fait dans 100 molécules, il sera 100 fois plus petit, c'est-à-dire :

$$\Delta.\frac{N}{n}.\frac{1}{100} \text{ ou } \Delta\frac{1}{c}.\frac{m}{M} \text{ ou enfin } \Delta.\frac{P}{p \times 100} \times \frac{m}{M} \qquad (4)$$

en supposant la loi de Blagden exacte pour les divers degrés de concentration d'une même solution.

137. *Influence de la concentration.* — A. Expériences sur le sucre de cannes. — B. Sur l'alcool. — C. Sur l'acide acétique. — D. Conclusion. — Correction de la loi de Blagden.

Les résultats cryoscopiques obtenus avec des solutions de même nature, à des degrés divers de concentration, peuvent s'exprimer par des tableaux numériques ou par des courbes.

M. Raoult, par exemple, construit les courbes d'*abaissement moléculaire*. On porte en abscisses les abaissements de congélation Δ ; $x = \Delta$ — et en ordonnées les abaissements moléculaires correspondants $y = \Delta\frac{m}{c}$ (1).

Quel que soit le procédé de figuration adopté pour représenter les résultats numériques, il ne constitue qu'un moyen de mettre en lumière la chose essentielle, c'est-à-dire la manière dont le résultat cryoscopique varie avec

(1) On a considéré deux autres espèces de courbes. C'est, en premier lieu, la *courbe des coefficients d'abaissement* ; les abscisses sont les mêmes, c'est-à-dire les abaissements observés, $x = \Delta$; mais les ordonnées sont réduites proportionnellement, $y = \frac{\Delta}{c}$ au lieu de $y = \frac{\Delta}{c} \times m$ (m étant le poids moléculaire du corps dissous, lequel ne varie pas). — Enfin, on a construit la courbe des coefficients d'abaissement en fonction de la concentration : les ordonnées sont encore les coefficients d'abaissement $y = \frac{\Delta}{c}$, mais les abscisses, cette fois, sont les concentrations c.

les facteurs qui agissent sur lui — avec la concentration de la solution, avec sa nature, avec la pression.

Le premier point et le plus discuté est relatif à l'influence de la concentration.

Pour l'élucider, il importe de distinguer les solutions véritables (solutions de non-électrolytes), des solutions salines ou pseudo-solutions (solutions d'électrolytes).

Les résultats des expériences faites sur les solutions aqueuses de sucre, d'alcool et d'acide acétique, peuvent servir de type pour les solutions de matières organiques, non électrolytes.

A. Cryoscopie du sucre de cannes en solutions aqueuses. — Nous donnons ici les résultats des expériences de M. Raoult, à propos des solutions de sucre (1).

Le poids moléculaire m est égal à 342.

Concentration. Poids c de sucre dans 100 gr. d'eau.	$x = \Delta$. Abaissement observé du point de congélation.	$y = \frac{\Delta}{c} \times m$. Abaissement moléculaire.
34gr,565	2°,0897	20,79
17 ,292	0 ,9892	19,59
8 ,550	0 ,4806	19,29
4 ,2756	0 ,2372	18,97
2 ,2311	0 ,1280	18,85
0 ,9729	0 ,0532	18,70

On voit que pour des concentrations qui varient de 1 gramme à 17 grammes pour 100 grammes d'eau, l'abaissement moléculaire varie de 18,70 à 19,59. Il est donc à peu près constant. Au-dessous de la concentration 1 p. 100, les déterminations deviennent difficiles ; le point de congélation s'approche beaucoup de zéro.

Si l'on construit la courbe des abaissements moléculaires, par points, en

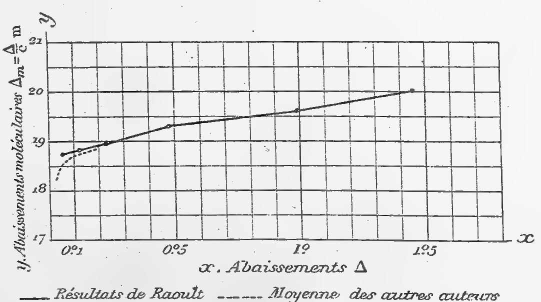


Fig. 450. — Solutions de sucre de canne.

portant, pour chaque solution de concentration différente, l'abaissement observé comme abscisse $x = \Delta$ et l'abaissement moléculaire $y = \frac{\Delta}{c} \times m$ comme

(1) F.-M. Raoult, Cryoscopie de précision (*Annales de l'Université de Grenoble*, t. X, n° 3, p. 41, extrait).

ordonnée, on constate que l'on aura à peu près une ligne droite, peu inclinée, presque parallèle à l'axe des abscisses. L'équation de cette droite est $y = 18,72 + x . 0,99$. Il reste une indétermination pour la partie du tracé voisine de l'axe des ordonnées, c'est-à-dire correspondant à une dilution extrême. Si l'on prolonge le tracé, c'est-à-dire la droite, jusqu'à cet axe, elle le coupera à la hauteur 18,72. L'*abaissement moléculaire* à l'origine, qui correspond ainsi à l'abscisse nulle, c'est-à-dire à la dilution infinie, serait donc 18,72. On donne le nom d'*abaissement moléculaire limite* à la valeur ainsi obtenue en prolongeant la partie droite de la courbe jusqu'à l'axe des ordonnées. Correspond-il à une réalité? Est-ce vraiment vers ce point

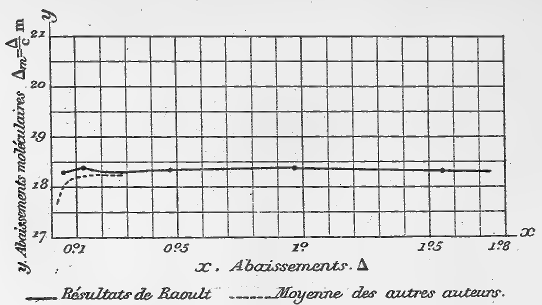


Fig. 451. — Solutions d'alcool.

que tend l'abaissement moléculaire réel observé, à mesure que la dilution devient plus grande? La question n'est pas résolue; il est possible qu'elle le soit négativement.

B. Cryoscopie de l'alcool en solutions aqueuses. — Pour les solutions d'alcool dans l'eau, les résultats cryoscopiques sont indiqués dans ce tableau:

Alcool. $m = 46$. Concentration. Poids c d'alcool dans 100 gr. d'eau.	$x = \Delta$. Abaissement observé du point de congélation.	$y = \frac{\Delta}{c} . m$. Abaissement moléculaire.
5 gr,014	1°,9900	18,26
2 ,418	0 ,9645	18,34
1 ,195	0 ,4760	18,32
0 ,595	0 ,2367	18,29
0 ,301	0 ,1207	18,34
0 ,151	0 ,0600	18,28

Pour des concentrations qui varient entre les limites étendues (de 0gr,1 à 5 grammes pour 100 grammes d'eau), on voit que l'abaissement moléculaire est sensiblement constant et égal à 18,3.

La courbe des abaissements moléculaires pour l'alcool se confond à très peu près avec une droite parallèle à l'axe des abscisses. L'équation de cette droite est $y = 18,3$.

L'*abaissement moléculaire à l'origine* s'obtient en prolongeant cette droite jusqu'à l'axe des ordonnées : 18,3 est la valeur de cette ordonnée à l'origine, représentant la limite vers laquelle tend l'abaissement moléculaire

à mesure que la dilution augmente. Mais il n'est pas sûr que cet abaissement limite réponde bien à la réalité.

D'une façon générale, le prolongement, jusqu'à l'axe des ordonnées, de la partie droite et voisine du tracé, n'est pas autre chose qu'un moyen de se rendre compte de la manière dont les choses se passeraient si la marche du phénomène cryoscopique restait régulière. Mais il est possible et même probable qu'elle ne peut conserver cette régularité lorsque le degré de dilution devient trop considérable (**138**, note).

C. Cryoscopie de l'acide acétique en solutions aqueuses. — Voici le tableau des résultats cryoscopiques pour les solutions d'acide acétique dans l'eau (Ponsot) (1) :

Acide acétique $C^2H^4O^2$ $m = 60$.

Concentration. Poids c d'acide acétique dans 100 gr. d'eau.	$x = \Delta$, Abaissement observé du point de congélation.	$y = \frac{\Delta}{c} \cdot m$. Abaissement moléculaire.
0 gr,152	0°,047	18,47
0 ,160	0 ,051	18,70
0 ,306	0 ,094	18,38
0 ,375	0 ,115	18,35
0 ,534	0 ,165	18,43
1 ,618	0 ,490	18,16
2 ,954	0 ,881	17,89
5 ,107	1 ,534	18,02

L'abaissement moléculaire à l'origine est 18,40.

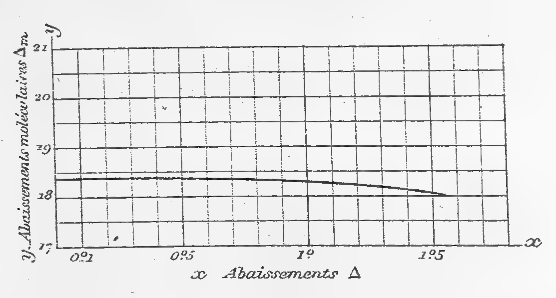


Fig. 452. — Solutions d'acide acétique.

D. Conclusion. — Loi des concentrations. — Correction de la loi de Blagden. — Il y a deux cas à examiner.

1° La ligne figurative des abaissements moléculaires est une droite sensiblement parallèle à l'axe des abscisses. Alors, l'abaissement moléculaire est constant, pour toute concentration. C'est ce qui arrive pour les solutions d'alcool dans l'eau. La molécule du corps dissous produisant toujours le même abaissement partiel, l'abaissement cryoscopique d'une solution quelconque est proportionnel au nomrbe des molécules existantes dans la masse

(1) La concentration a été exprimée à la façon ordinaire, et les résultats de l'expérience calculés de même, en se servant des nombres expérimentaux de M. Ponsot.

dissolvante, c'est-à-dire à la concentration. La loi de Blagden est vérifiée rigoureusement.

2° Mais, dans le cas général, elle n'est vérifiée qu'approximativement. La ligne des abaissements moléculaires est encore une droite (ou une suite de droite); seulement cette droite est plus ou moins faiblement inclinée sur l'axe des abscisses dans la partie que nous considérons habituellement et qui correspond à des solutions faiblement et modérément étendues. — La proportionnalité aux concentrations n'est pas rigoureuse. L'abaissement moléculaire n'est pas constant quelle que soit la concentration, mais, au contraire, il varie avec cette concentration. La nature de cette dépendance entre l'abaissement cryoscopique Δ et la concentration c est indiquée par l'équation de la ligne qui est toujours de la forme :

$$y = a + b\,x \ldots \text{ou} \frac{\Delta}{c}\,m = b + a\Delta \qquad (6)$$

On voit qu'à mesure que a devient plus petit, ce cas se rapproche de plus en plus du précédent.

Cette formule, qui ne se prête pas à un énoncé simple, remplace la loi de Blagden corrigée.

Au résumé, pour les substances non électrolytes, en solution aqueuse, à divers degrés de concentration, la loi de Blagden est, soit rigoureusement, soit approximativement vérifiée. Les abaissements cryoscopiques sont proportionnels aux concentrations — ou, ce qui revient au même, l'abaissement moléculaire (c'est-à-dire produit par la solution d'une molécule dans 100 grammes d'eau) est constant. Une molécule quelconque de corps dissous en vaut une autre au point de vue de l'action dépressive sur la température de solidification (point cryoscopique).

— Après avoir examiné les solutions de concentrations diverses que l'on peut faire avec un même corps, il faut maintenant faire varier la nature du corps dissous, et comparer les diverses solutions au point de vue cryoscopique. Il faut faire varier aussi la nature du dissolvant et chercher s'il y a une relation entre les valeurs cryoscopiques correspondantes.

Cette relation existe, en effet. Elle se traduit par une loi éminemment simple que l'on peut énoncer ainsi :

La dépression cryoscopique d'une solution (abaissement du point de congélation) est indépendante de la nature du corps dissous et de la nature du dissolvant. Elle ne dépend que du nombre de molécules de l'un et de l'autre.

La démonstration expérimentale peut, en quelque sorte, se scinder en deux parties : 1° indifférence de la nature du corps dissous ; 2° indifférence de la nature du dissolvant.

Mais avant d'en venir à cette démonstration, il faut ne pas perdre de vue une remarque essentielle ; c'est qu'il ne s'agit pas ici de toutes les solutions, mais de celles qui ne subissent point la décomposition électrolytique, qui

ne conduisent point l'électricité ; c'est-à-dire, nommément, des solutions aqueuses des substances organiques ou, en général, des solutions de tous les corps dans les dissolvants autres que l'eau.

138. *Influence de la nature du corps dissous. — Loi de Raoult : Tous les corps dissous, non électrolytes, produisent le même abaissement moléculaire de congélation (à l'origine).* — En étudiant les solutions de trois substances organiques dans l'eau, nous venons de voir que l'abaissement cryoscopique de la liqueur était sensiblement ou rigoureusement proportionnel au nombre de molécules du corps dissous dans une même masse de dissolvant : ou, en d'autres termes, que l'abaissement moléculaire était constant.

Cas général. — L'étude des dissolutions aqueuses des substances qui ne sont point des électrolytes, d'une part, et l'étude des dissolutions dans des solvants différents de l'eau, d'autre part, aboutissent aux mêmes conclusions : elles fournissent des tracés comparables à ceux que donnent le sucre, l'alcool et l'acide acétique. *La courbe des abaissements moléculaires est sensiblement une droite plus ou moins inclinée sur l'axe des abscisses.*

Il en est ainsi au moins pour la portion de cette courbe qui n'est pas trop éloignée de l'axe des ordonnées, c'est-à-dire qui correspond à des concentrations pas trop fortes et à des solutions dont l'abaissement de congélation, par conséquent, n'est pas trop grand.

Il en résulte que pour tous les corps organiques, non électrolytes, dissous dans l'eau, les choses se passent comme pour le sucre. Nous avons vu que pour celui-ci la droite figurative des abaissements moléculaires était représentée par l'équation

$$y = 18{,}72 + 0{,}99x$$

où $x = \Delta$ est l'abaissement cryoscopique observé de la solution et $y = \frac{\Delta}{c} \times m$ est l'abaissement moléculaire.

Pour toutes les autres substances, il en est de même. La droite figurative de l'abaissement moléculaire, dans le cas général, aura donc une équation telle que

$$y = b + ax\ldots \text{ où } y = \frac{\Delta}{c} m. \text{ et } x = \Delta.$$

Les coefficients a et b sont des constantes fournies par l'expérience. Leur signification est bien simple. L'un caractérise le point où cette droite rencontre l'axe des ordonnées ; l'autre caractérise l'angle qu'elle forme avec cet axe. Le coefficient a est la tangente trigonométrique de l'angle de la droite avec l'axe des x. Le coefficient b est l'ordonnée correspondant à $x = 0$, c'est-à-dire au point où la droite figurative prolongée rencontrerait l'axe des ordonnées. Elle représenterait l'*abaissement moléculaire limite* (pour une dilution croissant jusqu'à l'infini) si la formule était encore applicable à ce moment-là. Mais, les déterminations dans le voisinage du zéro, c'est-à-dire

pour des solutions assez diluées pour avoir presque même point de congélation que l'eau, sont très difficiles ; les auteurs ne s'accordent pas à leur sujet. On ne sait pas, en définitive, si la droite figurative que l'on prolonge, jusqu'à l'axe des ordonnées) continue à représenter les abaissements moléculaires répondant à l'expérience. Il y a des raisons de croire qu'elle ne les représente plus ; soit que la solution infiniment diluée ne conserve pas la même constitution, soit qu'elle ne suive pas les mêmes lois (1).

Mais, que l'*abaissement moléculaire à l'origine* ait, ou non, une signification réelle, ce n'en est pas moins une grandeur intéressante, pour deux raisons : d'abord parce qu'elle caractérise la position de la droite qui, un peu plus loin, figure réellement les abaissements — et en second lieu, parce que la comparaison de ses valeurs conduit à une expression relativement simple des lois cryoscopiques.

— Quant à la valeur des deux coefficients a et b, elle peut s'obtenir au moyen de deux déterminations cryoscopiques faites dans un intervalle convenable, c'est-à-dire avec des solutions suffisamment étendues.

La relation $y = b + ax$ s'écrit

$$\frac{\Delta}{c} m = b + a\Delta \qquad (6)$$

On mesurera deux abaissements Δ_1, Δ_2 de solutions ayant respectivement les concentrations c_1 et c_2, et on aura

$$\frac{\Delta_1}{c_1} m = b + a\Delta_1, \quad \frac{\Delta_2}{c_2} m = b + a\Delta_2$$

d'où

$$(7) \qquad a = m\frac{\frac{\Delta_1}{c_1} - \frac{\Delta_2}{c_2}}{\Delta_1 - \Delta_2} \qquad \text{et} \qquad b = m.\Delta_1\Delta_2\frac{\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_1}}{\Delta_1 - \Delta_2} \qquad (8)$$

— En examinant des corps différents en solution dans le même dissolvant (ici, l'eau), on constate, chose remarquable, que b a toujours la même valeur. L'abaissement moléculaire est le même pour tous, ou, tout au moins, l'abaissement moléculaire limite, ou à l'origine. — Par exemple, nous avons vu que pour les solutions d'alcool dans l'eau, l'abaissement moléculaire était constant et égal à 18°,3. Pour le sucre de cannes l'abaissement moléculaire est un peu variable entre certaines limites; l'abaissement moléculaire à l'origine est 18°,7... Les deux nombres oscillent autour d'un même chiffre

(1) Quelle que soit l'influence de nature inconnue, en vertu de laquelle la molécule du corps dissous agit sur les molécules dissolvantes et les retient, de manière à retarder leur point de congélation, on peut imaginer que son action directe ne s'étend qu'à une certaine distance et sur un certain nombre de molécules d'eau, placées dans sa sphère d'action. Lorsque le nombre des molécules du corps est extrêmement diminué, il pourrait arriver un moment où une certaine quantité d'eau échappe, pendant un certain temps, à l'action du corps dissous. La proportionnalité de l'abaissement cryoscopique au nombre des molécules cesserait alors, — l'abaissement serait moindre. Il y aurait *affaissement* de l'abaissement moléculaire aux environs du zéro de congélation.

moyen 18°,5. Même résultat pour l'acide citrique, pour l'acide malique, pour l'acide tartrique, pour la glycérine, pour l'acide oxalique. On retombe toujours sur ce même nombre 18°,5.

Une pareille coïncidence, si régulièrement répétée, ne saurait être fortuite. Elle a, au contraire, une signification très profonde.

L'abaissement moléculaire est constant; c'est-à-dire qu'est constant, quel que soit le corps considéré, l'abaissement de congélation produit par le même nombre de molécules, puisque les poids moléculaires des divers composés répondent sinon à une molécule, au moins à des nombres égaux de molécules. Chaque molécule d'un corps, quel qu'il soit, abaisse d'une manière identique le point de congélation. Une molécule quelconque équivaut à une autre molécule quelconque. L'abaissement est fonction du nombre des molécules. C'est la loi de Raoult (1).

Dans l'eau, tous les corps organiques (non électrolytes) produisent le même abaissement moléculaire (à l'origine).

Cet abaissement est 18°,5 ou 19° pour tous ces corps, exception faite de l'acide oxalique et des ammoniums composés.

Les précautions pour cette vérification sont les suivantes : il faut prendre l'abaissement moléculaire à l'origine, lorsque l'abaissement observé n'est pas entièrement constant. Pour cela, il faut avoir l'ordonnée à l'origine b de la courbe figurative. On sait qu'on l'obtient au moyen de deux déterminations cryoscopiques faites sur des solutions étendues. Ces solutions doivent être choisies; leurs concentrations c_1, c_2, doivent être telles que leurs points de congélation Δ_1, Δ_2, ne soient pas trop éloignés du zéro. On a alors

$$b = m.\Delta_2\Delta_1 \frac{\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_1}}{\Delta_1 - \Delta_2}$$

1) On pourrait présenter la vérification de cette loi de Raoult d'une manière élémentaire. Imaginons que l'on prépare une série de huit vases identiques dans chacun desquels on met 100 grammes d'eau. On ajoute dans le premier 1 gramme de sucre de cannes; dans le second 1 gramme d'acide citrique ; dans le troisième 1 gramme de glucose; et dans les suivants le même poids d'acide tartrique, d'acide malique, de glycérine, d'acide oxalique. On détermine le point de congélation de ces solutions : partout il est inférieur à zéro. Dans le vase qui contient l'alcool, la température de formation de la glace est — 0°,402, comme nous l'avons dit, et l'abaissement est 0°,402, par rapport à l'eau pure ; il est de 0°,054 pour le sucre; 0°,096 pour la solution citrique; 0°,103 pour le glucose; 0°,123 pour la solution tartrique; 0°,201 pour la glycérine; 0°,205 pour l'acide oxalique. Ce sont là les *coefficients d'abaissement* de ces substances.
Demandons-nous ce que serait l'abaissement de congélation, non plus dans la solution qui contient 1 gramme d'alcool ou de chacun des corps, mais dans la solution qui contiendrait le nombre de grammes que représente son poids moléculaire; par exemple, dans la solution qui, pour 100 grammes d'eau, contiendrait 46 grammes d'alcool; 342 grammes de sucre de cannes; 192 grammes d'acide citrique; 180 grammes de glucose; 150 grammes d'acide tartrique; 134 grammes d'acide malique; 92 grammes de glycérine; 90 grammes d'acide oxalique. Les abaissements étant supposés proportionnels aux poids dissous dans la même quantité de dissolvant (loi de Blagden), il faudra multiplier l'abaissement pour 1 gramme par le nombre de grammes du poids moléculaire : 0°,402 par 46 pour l'alcool; 0°,054 par 342 pour le sucre; 0°,096 par 192 pour l'acide citrique; 0°,103 par 180 pour le glucose; 0°,123 par 150 pour l'acide tartrique; 0°,138 par 134 pour l'acide malique; 0°,201 par 92 pour la glycérine; 0°,205 par 90 pour l'acide oxalique. Or, et c'est là le fait remarquable, tous ces produits ont la même valeur : 18,5. L'abaissement correspondant aux poids moléculaires est identique, quel que soit le corps considéré; identique est donc l'abaissement de congélation produit par le même nombre de molécules, puisque les poids moléculaires des divers composés répondent, sinon à une molécule, au moins à des nombres égaux de molécules. Chaque molécule d'un corps, quel qu'il soit, abaisse d'autant le point de congélation de l'eau dans laquelle il est dissous.

Il ne faut pas oublier que le calcul de l'abaissement moléculaire et son interprétation supposent la loi de Blagden. Le nombre expérimental, celui que l'on détermine, est l'abaissement correspondant à une certaine solution : l'abaissement moléculaire est un nombre théorique que l'on déduit de celui-là, en supposant que les abaissements sont proportionnels aux poids dissous dans la même quantité de dissolvant. Par exemple, pour l'alcool, la solution contenant 1 gramme pour 100 d'eau se congèle à — 0°,402. L'abaissement de congélation est donc de 0°,402. C'est l'abaissement pour 1 gramme dans 100 grammes, c'est-à-dire le *coefficient d'abaissement* de l'alcool dans l'eau. On se demande, comme M. de Coppet, en 1872, eut le premier l'idée de le faire (pour les corps qu'il considérait), ce que serait cet abaissement, non plus pour 1 gramme, mais pour le nombre de grammes que représente son poids moléculaire, c'est-à-dire 46. Il sera 46 fois plus grand, d'après la loi de Blagden : il sera $0°,402 \times 46 = 18°,5$.

— En outre des solutions aqueuses, les physiciens ont pratiqué des déterminations cryoscopiques sur un grand nombre d'autres solutions, faites dans des dissolvants divers, employés à froid ou préalablement fondus. M. Raoult a étudié particulièrement l'acide formique, l'acide acétique, le thymol, la benzine, la nitrobenzine, le bi-bromure d'éthylène, la naphtaline fondue, le bromure stannique, etc.

On constate, avec chacun de ces dissolvants, en particulier, ce que l'on vient de constater avec l'eau. Quelle que soit la nature du corps dissous dans l'eau — pourvu qu'il soit non électrolyte — il produit le même abaissement moléculaire. Avec les autres dissolvants, il n'y a jamais d'électrolyse ; tous les corps dissous sont non électrolytes. La loi de Raoult se généralise :

Dans un même dissolvant (autre que l'eau), tous les corps dissous — et, dans l'eau, tous les corps (non électrolytes) dissous — produisent le même abaissement moléculaire (à l'origine).

139. Existence de deux valeurs pour l'abaissement moléculaire limite. — *Tableau des valeurs de l'abaissement moléculaire normal.* — Avant de passer à la comparaison des dissolvants différents, il importe de formuler une réserve. — En réalité, ce n'est pas une valeur unique que l'on trouve. On en trouve deux. Les nombres observés oscillent autour de deux valeurs moyennes, différentes l'une de l'autre.

En voici des exemples : 1° les substances dissoutes dans l'*acide acétique* déterminent en général un abaissement moléculaire Δ_m voisin de 39. C'est le cas pour toutes les matières organiques sans exception : c'est encore le cas pour beaucoup de matières inorganiques, telles que les acides minéraux faibles, les chlorures minéraux anhydres, SCl^2, $SnCl^4$, etc., les acétates des métaux alcalins. Ce nombre *39* est la *valeur normale de l'abaissement moléculaire* pour les corps dissous dans l'acide acétique.

Mais on en trouve un autre lorsque l'on opère sur l'acide sulfurique, l'acide chlorhydrique et l'acétate de magnésium. Pour ces trois corps, le nombre est *19*. C'est l'*abaissement anormal* correspondant à l'acide acétique. — On remarquera que ce nombre aberrant est sensiblement la moitié de l'abaissement normal.

2° Dans la *benzine* employée comme dissolvant, il y a également deux valeurs pour l'abaissement moléculaire. L'abaissement moléculaire normal Δ_m est voisin de *49*. C'est celui que fournissent tous les composés organiques et les chlorures minéraux.

On trouve une autre valeur, moitié de la précédente $\Delta_m = 25$, lorsque l'on opère avec les alcools les moins élevés dans la série et les acides.

Le fait est assez général. Il faut donc corriger l'énoncé de la loi et dire que *dans le cas de dissolvants autres que l'eau, les abaissements moléculaires à l'origine, produits par les différents corps dissous, oscillent autour de deux valeurs moyennes, dont l'une, l'*ABAISSEMENT MOLÉCULAIRE NORMAL Δ_m, *est double de l'autre.*

La deuxième valeur peut s'expliquer, en admettant, comme M. Raoult, que les corps qui la fournissent ont subi une condensation en se dissolvant : que deux molécules sont condensées en une seule, cette molécule géminée agissant comme une molécule unique pour déprimer le point de congélation. En considérant donc comme normal, c'est-à-dire comme répondant au cas où les molécules *dissoutes ne sont pas* modifiées, mais seulement dispersées, l'abaissement moléculaire le plus grand, on se trouve ramené à la conclusion générale de tout à l'heure. *Dans les solutions régulières (non électrolysables), la molécule du corps dissous, quelle qu'en soit la nature, exerce le même pouvoir d'abaissement sur le point de congélation.*

Voici le tableau des valeurs de l'abaissement moléculaire normal (à l'origine pour divers dissolvants :

Δ_m.	Eau.	Ac. formique.	Ac. acétique.	Benzène.	Nitrobenzène.	Phénol.	Bromure d'éthylène.
Abaissement moléculaire normal.	18,5	29	39	49	70	74	118

Pour d'autres dissolvants, plus rarement considérés, on a les valeurs suivantes :

Acide palmitique	44	Sodium..	90
Paratoluidine..........	51,1	Étain.................	287
Diphénylamine.........	88	Mercure..............	425

140. *Influence de la nature du dissolvant.* — On peut aller plus loin, et annoncer que l'abaissement de congélation régulier, déjà indépendant de la nature du corps dissous, — lequel n'intervient que par le nombre de ses molécules, — est sensiblement indépendant aussi de la nature du dissolvant, — lequel n'intervient également que par le nombre des siennes (1).

C'est ce que M. Raoult a constaté en étudiant un grand nombre de dissolvants. Il faut, pour mettre le fait en lumière, introduire la notion moléculaire dans l'appréciation de la quantité du dissolvant, et calculer l'abaissement produit par une molécule de substance dissoute non plus dans 100 grammes de dissolvant, mais dans une molécule de dissolvant, — ou, plutôt, dans 100 molécules de dissolvant, ce qui est la même chose, à un facteur constant près, mais ce qui a l'avantage, d'abord de mieux figurer une solution étendue, et ensuite de débarrasser des fractions décimales.

(1) « Ceci, d'ailleurs, est naturel, dit M. Raoult. En effet, quelle que puisse être la nature de l'action accomplie entre les molécules du dissolvant et celles du corps dissous, elle semble devoir être réciproque ; si l'effet produit est indépendant de la nature du corps dissous, il doit l'être vraisemblablement de la nature du dissolvant. » (Cité par CHANOZ. *Considérations sur la pression osmotique*, p. 56.)

Appelons N le nombre de molécules — de poids moléculaire M — qui existent dans 100 grammes du dissolvant. On a 100 gr. = M.N. — D'autre part on a, pour le corps dissous, en appelant m son poids moléculaire et n le nombre de molécules contenues dans c grammes, $c = m \times n$.

Si $\Delta m = \frac{\Delta}{c} \times m$ représente l'abaissement produit par une molécule dissoute dans 100 grammes, $\frac{\Delta}{c} . m \times 100$ représentent (d'après la loi de Blagden) l'abaissement produit par la solution 100 fois plus concentrée formée par une molécule dissoute dans 1 gramme ; $\frac{\Delta}{c} \frac{m}{M}$ sera l'abaissement produit par la solution contenant 1 molécule dissoute dans 100 du dissolvant. En d'autres termes, en divisant l'abaissement moléculaire normal $\Delta m = \frac{\Delta}{c} \times m$ par le poids moléculaire M du dissolvant, on obtient l'abaissement normal produit par une molécule du corps dissous dans 100 molécules dissolvantes. C'est l'expression $\frac{\Delta}{c} . \frac{M}{m}$.

En procédant ainsi avec les divers dissolvants énumérés plus haut, on trouve un nombre assez constant pour l'abaissement normal produit par une molécule dans 100 molécules dissolvantes.

Par exemple, avec l'acide formique on trouve 0,63, — ce qui signifie qu'une molécule d'un corps quelconque dissoute dans 100 molécules d'acide formique produit un abaissement moléculaire normal (à l'origine) égal à 0°,63. — Pour l'acide acétique on a 0,65 ; pour le thymol 0,61 ; pour la benzine 0,63 ; pour la nitrobenzine, 0,59 ; pour le bromure d'éthylène, 0,63 ; pour la naphtaline, 0,58 ; pour le bromure stannique, 0,64.

Laissons, pour un moment, de côté l'eau, qui se comporte d'une manière spéciale. On voit que l'abaissement produit par la dissolution d'une molécule quelconque dans 100, est sensiblement invariable, quel que soit le dissolvant. Il ne varie que de 0,59 à 0,64. « Ce fait est d'autant plus remarquable que les circonstances, auxquelles on pourrait attribuer une influence sur le phénomène, sont fort différentes pour les divers dissolvants ; par exemple, leurs poids moléculaires varient dans le rapport de *1* à *9* ; leurs points de solidification varient de 5° à 80° ; leurs chaleurs latentes de fusion varient de 1 à 8. Il y a donc de fortes raisons pour croire que ce n'est point là une concordance purement fortuite et sans signification (1). »

L'eau seule fait exception.

DISSOLVANT.	POIDS moléculaire du dissolvant.	ABAISSEMENT moléculaire normal. $m = \frac{\Delta}{c}$	ABAISSEMENT produit par 1 moléc. dans 100 molécules. $\frac{\Delta}{c} . \frac{m}{M}$.
Eau, H^2O	18	18,5	1,02
Acide formique, CH^2O^2	46	29	0,63
Acide acétique, $C^2H^4O^2$	60	39	0,65
Thymol	150	92	0,61
Benzine, C^6H^6	78	49	0,63
Nitrobenzine, $C^6H^5AzO^2$	123	73	0,59
Bibromure d'éthylène	188	119	0,63
Naphtaline	128	74	0,58
Bromure stannique	438	243	0,64

(1) F.-M. Raoult, *Sur les progrès de la cryoscopie*. Grenoble, 1889, p. 45.

L'eau fournit un chiffre fortement aberrant, 1,02 ; et cette particularité est de nature à apporter des restrictions essentielles à la généralité de la loi précédente — à moins que l'on ne soit en état d'expliquer l'anomalie. On l'a essayé en faisant remarquer que l'eau est le seul dissolvant qui diminue de volume en passant de l'état solide à l'état liquide. Cette contraction peut tenir à une condensation moléculaire ; et, en l'interprétant convenablement, on a tenté de rendre compte de la majoration de la valeur de l'abaissement moléculaire.

Si l'on passe par-dessus ces difficultés de détail pour s'en tenir aux grandes lignes du phénomène, si l'on convient de négliger pour un moment les petits écarts, on pourra conclure qùe :

La dépression cryoscopique est indépendante de la nature du corps dissous et de la nature du dissolvant. Elle ne dépend que du nombre de molécules de l'un et de l'autre. C'est une propriété moléculaire et non spécifique. C'est la même conclusion à laquelle nous nous étions déjà arrêtés, une première fois, à propos de la pression osmotique (**82**), et une seconde fois (**105**) à propos de la dépression tonométrique ; ce sont également des propriétés moléculaires et non spécifiques.

C'est de là que vient précisément l'intérêt de leur étude : c'est qu'elles nous renseignent sur la concentration moléculaire des solutions.

A la vérité, ni pour la pression osmotique, ni pour la dépression tonométrique, ni pour l'abaissement cryoscopique, cette sujétion exclusive de la grandeur u phénomène au seul nombre des molécules n'a été établie avec une rigueur expérimentale absolue. Dès que l'on pousse très loin la précision des mesures, la concordance n'est plus qu'approximative. Mais il faut remarquer que, dans l'histoire des sciences physiques, il en a été ainsi pour la plupart des principes très généraux.

141. *Les propriétés principales des solutions sont des propriétés additives.* — Nous devons donc admettre, au moins comme une vérité approximative, que les propriétés osmotiques, tonométriques, cryoscopiques des solutions, c'est-à-dire leurs propriétés physiques principales, sont liées au nombre des molécules et non à leur spécificité chimique.

On leur donne le nom de *propriétés additives ou colligatives* ; les phénomènes eux-mêmes sont souvent qualifiés d'additifs ou colligatifs. Ils n'ont aucun caractère spécifique ; ils ne dépendent en aucune façon de l'espèce particulière du corps qui les manifeste. A la vérité, les phénomènes physiques en général semblent être dans le même cas ; ils sont indépendants de l'espèce de substance qui en est le théâtre, et c'est même par là qu'on les distingue des phénomènes chimiques. Mais, il y a ici quelque chose de plus. Les phénomènes colligatifs sont indépendants de la nature du corps où ils apparaissent, non seulement quant à leur nature, mais encore quant à leur grandeur. Ils n'ont de sujétion à aucun des paramètres physiques qui règlent la grandeur des autres phénomènes ; tels que poids spécifique, densité, coefficient de dilatation, chaleur spécifique, etc. ; ils n'ont de sujétion qu'au nombre des particules physiques que le corps présente dans un espace donné.

C'est le cas pour les propriétés générales des gaz, et par exemple pour la

pression gazeuse. La physique étudie les propriétés des gaz sans prononcer leurs noms particuliers. Qu'il s'agisse d'oxygène, d'hydrogène, d'azote, d'acide carbonique, etc., le même nombre de molécules dans le même espace produira la même pression; la réduction du volume dans une certaine proportion augmentera dans la même proportion aussi la valeur de cette pression. La pression gazeuse est une propriété additive ; c'est une somme d'effets où chaque particule a la même part, quelle que soit sa nature et dans la grandeur de laquelle leur nombre seul intervient. Tel est, au moins, le sens du principe d'Avogadro, en ce qui concerne les gaz : tout y dépend de la *concentration moléculaire.*

Les corps dissous sont dans le même cas. Presque toutes leurs propriétés dépendent de la concentration moléculaire, — non seulement leur pression qui est, ici, la pression osmotique, — mais le point de congélation de leurs solutions, leur point d'ébullition, leur tension de vapeur, leur pouvoir de conduire l'électricité, le degré de solubilité qu'elles déterminent chez divers corps. Il faut y ajouter, d'après Arrhénius, Ostwald et Nernst, la couleur des dissolutions, le pouvoir rotatoire, les indices de réfraction, et jusqu'à certaines propriétés chimiques. Ce sont là autant de propriétés colligatives. L'une quelconque d'entre elles est une somme d'effets où chaque molécule, quelle qu'elle soit, participe également, et dont la valeur, en conséquence, ne dépend que du nombre des participants. Telle est, au moins, la conclusion philosophique des études qui ont été poursuivies, depuis quinze ans, par les physiciens chimistes. Nous avons dit la grande part qui revient à M. Raoult dans la conquête de ces résultats.

Il faut bien savoir que ce principe si général, qui attribue tant de vertu à un simple nombre (de molécules), qui en fait découler tant de phénomènes et sortir tant de mesures précises, est encore très discuté. Un petit nombre de physiciens l'acceptent comme une vérité hors de conteste ; pour la plupart il conserve les caractères d'une hypothèse plus ou moins féconde.

On peut l'admettre comme une vérité provisoire, ou comme une première approximation. Elle permet de comprendre l'intérêt qui s'attache à la cryoscopie.

142. *Principe des applications de la cryoscopie.* — L'abaissement du point de congélation d'une solution, la pression osmotique, la dépression de vapeur, l'abaissement du point d'ébullition, la conductibilité électrique, la diminution de solubilité, sont des grandeurs de diverses sortes qui se déduisent toutes de la concentration moléculaire, — et inversement la concentration moléculaire peut se déduire de chacune d'elles. Il en résulte, évidemment, qu'elles peuvent se déduire les unes des autres.

Cela étant, puisque l'on peut déduire les diverses mesures de l'une quelconque d'entre elles, le physicien choisira la plus simple, la plus commode, la plus facile à exécuter avec précision ; et c'est précisément la mesure cryoscopique.

Si, par exemple, un physicien ou un physiologiste veulent connaître la pression osmotique d'une solution, ils ne s'astreindront pas à la mesurer

directement, en plaçant la solution dans un osmomètre à membrane hémi-perméable plongeant dans l'eau pure. Ils soumettront la solution à une détermination cryoscopique; de cette valeur ils tireront les autres. On verra tout à l'heure quelles sont les relations exactes entre ces grandeurs.

Ce ne sont pas seulement les nombres moléculaires qui sont impliqués dans les mesures osmotiques, cryoscopiques et tonométriques; ce sont aussi les poids moléculaires. Ceux-ci peuvent donc se déduire aussi de ces mesures et particulièrement de la mesure cryoscopique. L'application principale de la cryoscopie est précisément celle qu'en font les chimistes à la détermination des poids moléculaires.

b. Pseudo-solutions. Solutions salines.

Les lois cryoscopiques précédemment exposées s'appliquent aux solutions des substances organiques dans l'eau et aux solutions de substances quelconques dans les solvants autres que l'eau, c'est-à-dire à un nombre considérable de solutions.

Une catégorie, très nombreuse aussi, de solutions paraît leur échapper : ce sont les solutions aqueuses des sels, acides forts, bases fortes, c'est-à-dire des électrolytes. Ces solutions ont une constitution particulière, plus ou moins compliquée, qui les distingue des véritables solutions. Dans une solution véritable, il y a simplement diffusion de la matière dissoute dans le dissolvant; c'est un mélange dans lequel corps solvant et corps dissous gardent les mêmes propriétés qu'à l'état isolé et ne contractent point entre eux de liaison chimique.

Dans les solutions des sels, des électrolytes en général, il n'en est pas ainsi. Le phénomène de diffusion s'accompagne de phénomènes secondaires qui altèrent les propriétés que le solvant et le dissous présentent hors de la solution : les deux corps contractent des liaisons. On ne connaît pas encore, d'une manière certaine, ces altérations et ces combinaisons. On discute sur leur nature, dissociation électrolytique, gémination ou condensation des molécules du dissous, combinaisons variées de la matière dissoute avec l'eau, c'est-à-dire formation d'hydrates divers : mais on ne discute plus sur leur existence. Des modifications de ce genre interdisent de considérer les solutions d'électrolytes comme des dissolutions pures et simples.

Il ne faut donc pas s'étonner que ces pseudo-solutions ne suivent pas exactement les lois osmotiques, tonométriques et cryoscopiques propres aux véritables. — La question est d'abord de savoir comment elles s'en écartent; et, en second lieu, comment il serait possible de les y ramener, en tenant compte des phénomènes secondaires qui, chez elles, viennent compliquer le phénomène de dissolution.

143. *Les deux anomalies des pseudo-solutions. Courbes des abaissements moléculaires.* — Avec les solutions régulières, l'abaissement cryoscopique ne dépend que du nombre des molécules : les solutions équimoléculaires produisent un même abaissement. Ce sont là des expressions

différentes de la même loi fondamentale. L'abaissement moléculaire Δ_m est constant, quelles que soient la concentration et la nature de la substance dissoute.

Nous avons vu (**138**) qu'il fallait légèrement modifier ces énoncés, en ce sens, qu'au lieu de parler d'abaissement moléculaire en général, il faut envisager l'*abaissement moléculaire à l'origine*. En effet, bien que, pour les solutions que nous avons en vue, solutions étendues, de diverses concentrations, l'abaissement moléculaire soit à peu près constant, ce n'est là qu'une approximation. En réalité, l'abaissement moléculaire varie un peu : sa courbe n'est pas exactement une droite parallèle à l'axe des abcisses; c'est une droite ou une série de droites bout à bout, inclinées sur cet axe. L'abaissement moléculaire ayant des valeurs légèrement différentes suivant la concentration, il convient de considérer l'une d'elles, qui est véritablement typique; c'est l'*abaissement moléculaire à l'origine*, correspondant à la concentration nulle. La raison de ce choix c'est que, en effet, pour les grandes dilutions, l'abaissement moléculaire tend à devenir constant et par conséquent caractéristique.

C'est cet abaissement moléculaire à l'origine, qui pour les véritables solutions (de non-électrolytes) envisagées jusqu'ici, est le même, quelle que soit la matière dissoute, pourvu que le dissolvant reste le même. On a vu que, pour les solutions aqueuses, il était égal à 18,5; — le sucre, l'alcool, toutes les autres substances organiques dissoutes dans l'eau produisent ce même abaissement. Pour les solutions acétiques, c'est 39; pour les solutions benzoïques, c'est 49 ; — et ainsi de suite (nº **139**). Cet abaissement moléculaire à l'origine est l'ordonnée du point où la ligne des abaissements moléculaires, suffisamment prolongée, rencontre l'axe des ordonnées. On l'obtient en prolongeant la direction générale de la courbe, ou seulement une partie rectiligne assez voisine de cet axe. Il suffit donc de déterminer deux points; en les joignant on a, à la fois, la direction générale du tracé et le point de rencontre avec l'axe, l'ordonnée à l'origine. Les deux déterminations peuvent être faites dans des limites assez étendues. On peut opérer sur des solutions de concentrations telles qu'elles donnent des abaissements compris entre 0°,2 et 2°, ou même davantage.

Tel est l'état des choses pour les solutions vraies et régulières.

Comment se comportent les pseudo-solutions, solutions aqueuses d'électrolytes, bases fortes, acides forts et sels ? Elles présentent deux anomalies.

Elles suivent moins exactement encore que les précédentes la loi des concentrations de Blagden; en second lieu, l'abaissement moléculaire est plus grand que pour les solutions normales : il est majoré.

144. Anomalie de majoration de l'abaissement moléculaire. — Coefficient ou facteur de correction i. — La première anomalie est relative aux valeurs des abaissements. L'abaissement moléculaire est toujours majoré ; il est toujours plus grand (sauf un cas) que l'abaissement des solutions précédentes. Il en est de même de l'abaissement moléculaire limite à l'origine.

Il faut observer, en passant, que cette notion même d'abaissement moléculaire limite perd de sa valeur ici, puisque le point de rencontre avec l'axe des ordonnées varie, à cause de la courbure du tracé, suivant la partie que l'on prolonge. Si, en effet, on construit la courbe des abaissements moléculaires pour ces solutions, ce n'est plus, en général, une droite ou une suite de droites plus ou moins inclinées sur l'axe des abscisses, mais une courbe véritable, moins tendue que dans le cas précédent.

Si l'on voulait traduire, d'après la notation moléculaire, la majoration que nous venons de signaler, il faudrait dire que la *molécule des corps électrolytes*, en solution, déprime le point de congélation d'une quantité variable et toujours plus grande que la molécule de tous les autres corps, non électrolytes. Ceux-ci dépriment le point de congélation d'une quantité plus petite et toujours égale.

L'abaissement moléculaire des solutions salines, même quand il ne présente pas la seconde anomalie, c'est-à-dire même quand il est peu variable avec la concentration, présente toujours la première (1) : il est toujours plus grand que l'abaissement normal des solutions aqueuses qui est 18,5.

L'*abaissement normal* des solutions aqueuses est, nous l'avons vu, représenté par le chiffre 18,5. $\frac{\Delta}{c} m = 18{,}5$. Or, pour les solutions salines de NaCl, cet abaissement est sensiblement constant et égal à 34,25 pour les concentrations variant de 6 grammes à $1^{gr},4$ pour 100 d'eau (solutions moyennement étendues); il varie de 34,25 à 37,2 pour les solutions contenant de $1^{gr},4$ à $0^{gr},176$ pour 100 d'eau, solutions dont l'abaissement cryoscopique varie de $0°,8211$ à $0°,1098$. L'*abaissement moléculaire limite*, à l'origine, est 37,2.

L'abaissement moléculaire, pour une solution donnée d'électrolyte, est donc égal à l'abaissement moléculaire normal multiplié par un facteur i plus grand que l'unité ($i > 1$). On a : Δ_m des dissolutions salines $= \Delta_m$ normal $\times\, i = 18{,}5 \times i$. Le facteur i est appelé *coefficient* ou *facteur de correction*; c'est le coefficient par lequel il faut multiplier l'abaissement moléculaire normal pour avoir l'abaissement moléculaire correspondant à la solution saline considérée. Le facteur de correction i est variable, pour un sel donné, avec la concentration.

Par exemple, à la limite, pour la solution infiniment diluée de NaCl, nous venons de trouver l'abaissement moléculaire égal à 37,2, c'est-à-dire à $18{,}5 \times 2{,}01\ldots\ i = 2{,}01$. Le facteur de correction i est alors sensiblement égal à 2. Pour la solution de concentration, 1,706 (contenant $1^{gr},706$ pour 100 grammes d'eau), l'abaissement moléculaire est 34,40, et le coefficient i est égal à 1,85.

Le coefficient i varie donc légèrement, pour un même corps dissous, suivant la concentration. Il varie d'un corps à un autre. Lorsque l'on parle d'abaissement moléculaire d'une substance dissoute dans l'eau, sans autre indication, on entend l'*abaissement moléculaire limite* ; par exemple 37,4 pour NaCl. De même, quand on parle du coefficient i relatif à une substance, sans indication de concentration, on entend le coefficient i correspondant à l'abaissement moléculaire limite. C'est dans ce sens que l'on dit, par exemple, que

(1) Sauf le cas des sels magnésiens (valeur 17 ; voy. plus bas, *5e catégorie*), et le cas des acides faibles et des bases faibles de nature minérale (*1re catégorie*).

l'abaissement moléculaire de KCl est 36,8 et que son coefficient de correction cryoscopique $i = 1,98$.

Si l'on considère les différents sels et électrolytes, on voit que les résultats cryoscopiques permettent de les ranger dans cinq catégories qui diffèrent par la valeur de l'abaissement moléculaire limite :

1re CATÉGORIE. — *Abaissement moléculaire normal, voisin de* **19** (**18,5**). — *Coefficient de correction i voisin de* **1**:

Les acides faibles de nature minérale, tels que SO^2, H^2S ;

Les bases faibles de nature minérale, AzH^3.

Ces corps se comportent donc sensiblement comme les substances organiques en solution aqueuse.

2e CATÉGORIE. — *Abaissements moléculaires voisins de* **35**. — *Coefficient de correction inférieur à* **2**, *mais voisin de* **2** :

Les alcalis forts, KOH, NaOH;

Les acides monobasiques forts, HCl, AzO^3H;

Les sels alcalins des acides monobasiques, NaCl; AzO^3,Na; $C^2H^3O^2Na$; AzO^3AzH^4.

3e CATÉGORIE. — *Abaissements moléculaires voisins de* **40**. — *Coefficient de correction* $i \geqq 2$:

Les acides bibasiques forts, SO^4H^2, CrO^4H^2,... CO^3H^2 ;

Les sels alcalins formés par les acides bibasiques, CO^3K^2; $SO^4(AzH^4)^2$; CrO^4K^2; SO^4Na^2.

4e CATÉGORIE. — *Abaissements moléculaires voisins de* **45**. — *Coefficient de correction* $i > 2$:

Les bases alcalines terreuses, $Ba(OH)^2$, $Ca\ (OH)^2$...

Les sels alcalins terreux à acides monobasiques : Ba, $(AzO^3)^2$, $BaCl^2$, $CaCl^2$...

5e CATÉGORIE. — *Abaissements moléculaires voisins de* **17**. — A rapprocher par conséquent de la 1re catégorie :

Sels des métaux divalents à acides bibasiques, SO^4.Mg.; CrO^4,Mg.

6e CATÉGORIE. — *Abaissements moléculaires voisins de* **130** : Al^2Cl^6 ; $(AzO^3)^6Al^2$.

Si l'on excepte ces deux dernières catégories, très particulières, ou seulement la dernière, on voit que les *valeurs de tous les abaissements moléculaires (limites) pour les solutions aqueuses* varient autour des deux chiffres **19-39**. Les variations extrêmes sont 17 à 22 pour le premier, 34 à 45 pour le second.

145. Anomalie d'infraction à la loi des concentrations. Variation de l'abaissement moléculaire avec la concentration. Solutions typiques. Autres solutions. L'hypothèse d'Arrhénius fait disparaître cette anomalie. — On peut dire, d'une façon générale, que les solutions d'électrolytes s'écartent de la loi de Blagden d'une manière beaucoup plus marquée que les solutions véritables. L'abaissement cryoscopique observé n'est pas sensiblement constant pour les diverses solutions du même sel, même quand on les considère à l'état de grande dilution.

Cela résulte de l'examen des courbes d'abaissement moléculaire pour les

diverses solutions. Ces graphiques ne sont plus des droites, ou des suites de droites plus ou moins inclinées sur l'axe des abscisses ; ce sont ordinairement des courbes véritables, moins tendues que les tracés des non-électrolytes. Ces courbes se relèvent au voisinage immédiat de l'axe des ordonnées, lorsque l'on passe des solutions étendues aux solutions extrêmement étendues.

Ce sont ces courbes qui remplacent en quelque sorte la loi de proportionnalité de Blagden. Les relations ainsi exprimées graphiquement ne se prêtent pas, au moins d'après ce que l'on sait jusqu'ici, à un énoncé simple et universel. Il faut les classer en catégories.

De ces catégories, la plus remarquable est celle qui a pour type le chlorure de sodium. Ces solutions peuvent être appelées *typiques* ; elles se comportent, entre des limites assez étendues, à la façon des solutions véritables de corps non électrolytes : elles ne présentent plus que la seconde anomalie, celle de majoration. Dans une grande partie de son tracé, la ligne des abaissements moléculaires est parallèle à l'axe des abscisses ; c'est-à-dire que l'abaissement moléculaire $\frac{\Delta\, m}{c}$ est constant et par conséquent que l'abaissement cryoscopique observé Δ est proportionnel à la concentration. Ces solutions suivent la loi de Blagden (1).

Voici les résultats cryoscopiques relatifs au chlorure de sodium :

Cryoscopie des solutions de chlorure de sodium. Poids moléculaire : $m = 58,5$.

Concentration c. Poids de NaCl dans 100 gr. d'eau.	Δ Abaissement du point de congélation.	$\Delta m = \frac{\Delta}{c} m$. Abaissement moléculaire correspondant.
5gr,850 (0,1 de $m =$ 58gr,5)	3°,4237	34,23
2 ,859	1 ,6754	34,28
4 ,400	0 ,8211	34,31
0 ,690	0 ,4077	34,55
0 ,341	0 ,2073	32,56
0 ,176	0 ,1098	36,43

Ces résultats s'expriment graphiquement de la manière suivante :

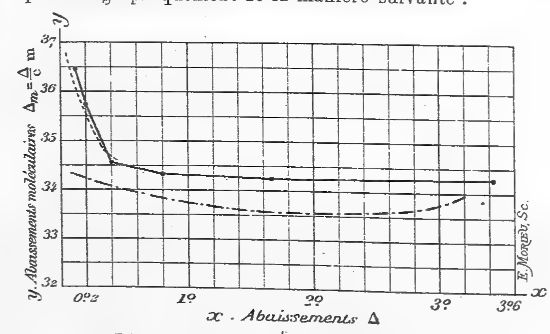


Fig. 453. — Solutions de chlorure de sodium.

(1) D'après la plupart des auteurs, les courbes de ces solutions typiques se relèvent dans le voisinage de l'axe des ordonnées. D'après Ponsot, ce relèvement n'existerait point. La figure 453 montre cette divergence.

Parmi les solutions qui se rapprochent de la précédente, on peut citer celle du chlorure de potassium.

Cryoscopie des solutions de chlorure de potassium. Poids moléculaire : $KCl = 74{,}5$.

Concentration c. Poids de KCl dans 100 gr. d'eau.	Δ Abaissement observé du point de congélation.	$\Delta m = \frac{\Delta}{c} m$. Abaissement moléculaire correspondant.
$7^{gr},460 \left(\frac{1}{10} \text{ de } m = 74^{gr},5\right)$	$3^{o},2864$	32,82
3 ,590	1 ,6012	33,24
1 ,766	0 ,7991	33,72
0 ,875	0 ,4007	34,12
0 ,436	0 ,2026	34,62
0 ,2171	0 ,1031	35,38
0 ,1080	0 ,0509	35,11

Les résultats s'expriment graphiquement de la manière suivante :

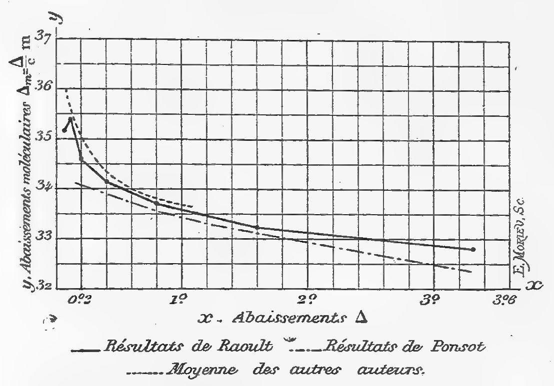


Fig. 454. — Solutions de chlorure de potassium.

Les autres catégories de solutions d'électrolytes s'éloignent plus ou moins des solutions typiques. La courbe (depuis la concentration : 0,1 du poids moléculaire dans 100 grammes d'eau) se relève plus ou moins rapidement. La loi de Blagden n'est pas observée ; l'abaissement moléculaire n'est pas constant ; l'abaissement observé Δ n'est pas proportionnel à la concentration, la concentration étant entendue à la façon ordinaire.

En l'entendant autrement, on fait disparaître cette anomalie, en même temps que l'anomalie de majoration. C'est ce que fait l'hypothèse d'Arrhénius. Elle suppose (**147**) le sel partiellement dissocié en ions, de manière à augmenter le nombre de molécules réellement actives. Ce degré de dissociation supposé, ce nombre de molécules actives, est précisément choisi pour chaque degré de concentration de manière que. chaque molécule exerçant le même effet, leur total produise l'effet observé. L'abaissement produit par chaque molécule de la solution est le même (en entendant par molécule tant les molécules chimiques que les molécules électrolytiques). L'abaissement moléculaire est constant. La loi de Blagden, désormais vérifiée, s'énonce ainsi : *L'abaissement du point de congélation est proportionnel à la concen-*

tration, en prenant pour concentration le nombre de molécules actives existant dans 100 grammes de solution.

La loi de Blagden devient ainsi la loi fondamentale des solutions. Ou bien elle est suivie, en fait et en réalité, comme cela a lieu pour les solutions de substances organiques et pour les solutions typiques d'électrolytes ; ou bien, pour les autres solutions, elle est suivie en vertu de la théorie d'Arrhénius, qui leur confère une constitution les faisant rentrer dans la règle commune.

146. Explication de l'anomalie de majoration de l'abaissement moléculaire. — A. Hypothèse de la dissociation en ions et de la valeur cryoscopique égale pour tous les ions et toutes les molécules. — B. Degré de dissociation ou d'ionisation. — C. Calcul du degré d'ionisation. — Dans toute la première partie de cette étude, nous avons vu l'abaissement cryoscopique lié au nombre des molécules et indépendant de leur nature, chacune ayant une influence identique : c'est une *propriété additive.* — Voici, maintenant, toute une catégorie pour laquelle il semble n'en être plus ainsi. La molécule des électrolytes aurait une action variable, différente pour chaque corps, c'est-à-dire spécifique et toujours majorée.

Sans doute, on peut accepter cette contradiction comme un fait. Mais on peut tenter aussi de l'expliquer, et de sauver, par une hypothèse acceptable, la généralité de la loi moléculaire. C'est ce qu'ont fait Van t'Hoff, Arrhénius, Ostwald, Nernst — et, en France, M. Raoult. Ils ont accepté l'idée que les substances électrolytes sont dissociées dans leurs prétendues solutions. Elles seraient dissociées en molécules électrolytiques ; en radicaux électro-positifs et électro-négatifs, comme l'on disait autrefois, en *ions* comme l'on dit aujourd'hui.

Ne retenons qu'une des propriétés que l'on est convenu d'attribuer à ces ions : c'est à savoir que chaque *ion* se comporte comme une *molécule* dissoute, quant à son action cryoscopique. Elle déprime également le point de congélation.

Si le sel est dissocié dans la solution aqueuse, le nombre des molécules actives se trouve augmenté, puisqu'une molécule dissociée donne plusieurs *ions*, deux au moins. La majoration de la dépression moléculaire est alors une simple apparence qui tient à ce que l'on attribue l'abaissement à un nombre de molécules moindre que le nombre réel. On peut supposer le nombre de molécules dissociées tel que l'abaissement moléculaire soit ramené à sa valeur normale, universelle (soit *18,5* pour les solutions aqueuses). C'est alors par le degré de cette dissociation, par le *degré d'ionisation* que les solutions différeront les unes des autres. Ce sera là la condition variable d'une solution à l'autre. Cette hypothèse d'une dissociation poussée plus ou moins loin, selon la solution considérée, chaque molécule complète et chaque *ion* ayant la même action cryoscopique, est l'hypothèse d'Arrhénius.

B. Degré d'ionisation. — L'hypothèse de la dissociation explique l'existence de la majoration de l'abaissement cryoscopique. Il faut quelque chose de plus : il faut rendre compte de sa valeur exacte, dans chaque cas. Pour cela, on suppose que la dissociation porte sur un certain nombre de molécules :

qu'elle est poussée jusqu'à un certain degré, dont on dispose précisément pour établir, dans chaque cas, l'accord de la théorie avec les mesures cryoscopiques.

Examinons comment on devra choisir, dans chaque cas particulier, ce *degré d'ionisation*, c'est-à-dire la proportion ou le tant pour cent des molécules qui ont subi la dissociation.

Il faut introduire, dans l'expression de l'abaissement moléculaire, le nombre de molécules de la solution considérée.

Soit la solution de concentration c (c grammes dans 100 grammes d'eau) m le poids moléculaire de la substance, Δ l'abaissement cryoscopique mesuré.

On a, par définition de l'abaissement moléculaire

$$\Delta_m = \frac{\Delta}{c} m. \qquad (\alpha)$$

Si n est le nombre de molécules du corps contenues dans la solution, chacune pesant m gramme, le poids total $c^{gr} = m \times n$ d'où $\frac{m}{c} = \frac{1}{n}$.

L'expression de l'abaissement moléculaire est donc

$$\Delta_m = \frac{\Delta}{n}. \qquad (\beta)$$

Ceci posé, voici comment se fera le calcul de la fraction a de ce nombre n qu'il faut imaginer dissociée.

C. Calcul du degré d'ionisation. — Il est utile de faire ce calcul d'abord dans un cas particulier, puis dans le cas général.

Soit le chlorure de sodium NaCl. Prenons la solution qui renferme $1^{gr},706$ de sel pour 100 grammes d'eau, c'est-à-dire dont la concentration est 1,706. Son point de congélation est -1°; l'abaissement de congélation est 1°; l'abaissement moléculaire est 34,40 ; le coefficient de correction i est égal à 1,85 ; en effet, $1,85 \times 18,5 = 34,40$. Demandons-nous combien de molécules NaCl auront dû subir la décomposition pour que l'abaissement moléculaire soit 34,40 au lieu de l'abaissement normal 18,5.

Soit n le nombre de molécules de NaCl dissoutes dans 100 grammes d'eau. Supposons que sur ces n molécules, il y en ait a d'ionisées, c'est-à-dire remplacées par 2 molécules K et Cl. Le nombre total des molécules actives sera donc :

$$\nu = (n - a) \text{ entières} + 2a \text{ ions} = n + a.$$

C'est ce nombre total qui, par hypothèse, agira pour abaisser le point de congélation et produire l'abaissement moléculaire normal. On aura donc, d'après la formule (β) :

$$\text{Abaissement moléculaire normal } \frac{\Delta}{\nu} = 18,5.... \qquad (\beta_1)$$

D'autre part, l'expérience réelle nous a appris que l'abaissement moléculaire de notre solution était égal à 34,40 ; c'est-à-dire que

$$\text{Abaissement moléculaire réel } \frac{\Delta}{n} = 34,40.... \qquad (\gamma_1)$$

Divisant (γ_1) par (β_1), on aura

$$\frac{\text{Abaissement moléculaire reel}}{\text{Abaissement moléculaire normal}} = \frac{\nu}{n} = \frac{34.40}{18,5}.$$

Ce même rapport est égal à i, coefficient de correction, par définition.

On trouve, en opérant,

$$\frac{\nu}{n} = i = 1{,}85$$

ou

$$\frac{n+a}{n} = \frac{1{,}85}{1} = \frac{185}{100} = i$$

d'où

$$\frac{a}{n} = \frac{85}{100} = \frac{i-1}{1}.$$

Ce qui signifie que sur un nombre n de molécules égal à 100, il y en aura $a = 85$ de dissociées.

C'est ce rapport $\frac{a}{n}$ qui exprime la fraction du nombre des molécules dissociées, que l'on nomme le *degré de dissociation* ou *d'ionisation*.

En résumé, en admettant que dans la solution considérée (n molécules-grammes de NaCl dans 100 grammes d'eau) il y ait 85 molécules ionisées sur 100, et que chacune ait l'action cryoscopique normale, unique, identique, attribuée à toute molécule, l'abaissement moléculaire sera précisément ce que l'expérience prouve qu'il est. L'accord de l'expérience et de la théorie sera établi.

— *Même calcul dans le cas général.*

Considérons une solution contenant n molécules dans 100 grammes d'eau (concentration $c = m \times n$).

Soit a le nombre de molécules ionisées et supposons que chacune fournisse p ions. Le nombre total des molécules actives sera donc :

$$\nu = n - a + pa = n + (p-1)a.$$

C'est ce nombre total ν qui agira pour abaisser le point cryoscopique. Le total produira l'abaissement cryoscopique observé Δ, et chacune, selon la théorie, produira l'abaissement moléculaire normal, 18,5.

On a donc :

$$\text{Abaissement moléculaire normal}\ \frac{\Delta}{\nu} = 18{,}5\ldots \qquad (\beta)$$

D'autre part, soit P la valeur réellement fournie par l'expérience pour Δ. L'abaissement moléculaire, conclu de l'expérience, était, par définition, $\frac{\Delta}{c}m$ ou $\frac{\Delta}{n}$.

Donc,

$$\text{Abaissement moléculaire trouvé}\ \frac{\Delta}{n} = \text{P}\ldots \qquad (\gamma)$$

Divisant (γ) par (β), il vient :

$$\frac{\text{Abaissement moléculaire trouvé}}{\text{Abaissement moléculaire normal}} = \frac{\nu}{n} = \frac{\text{P}}{18{,}5}.$$

Ce même rapport est, par définition du *coefficient de correction* i, égal à i.

On a donc, en remplaçant ν par sa valeur,

$$\frac{n+(p-1)a}{n} = \frac{\text{P}}{18{,}5} = i$$

d'où l'on tire par la règle des proportions

$$\frac{(p-1)a}{n} = \frac{\text{P}-18{,}5}{18{,}5} = \frac{i-1}{1}$$

et enfin

$$d = \frac{a}{n} = \frac{\text{P}-18{,}5}{18{,}5\times(p-1)} = \frac{i-1}{p-1}. \qquad \text{XXXIV}$$

Tel est le *degré de dissociation* ou *degré d'ionisation*, *d*.

En admettant donc que, dans la solution considérée, sur *n* molécules il y en ait un nombre *a* ionisées, et que toutes agissent conformément à l'hypothèse d'Arrhénius, l'accord sera établi entre la théorie et l'expérience.

La dissociation en ions n'est pas la seule cause qui puisse modifier le nombre des molécules introduites dans le dissolvant. Il peut se produire (particulièrement dans le cas des solutions concentrées) un phénomène qui a le même résultat, et qui consiste en ce que des molécules d'eau peuvent se fixer sur les molécules entières du corps dissous, ou même sur des ions, de manière à constituer des hydrates.

On conçoit sans peine qu'en disposant convenablement de ces deux éléments, le nombre des molécules dissociées, le nombre des molécules hydratées, on pourra toujours faire cadrer les résultats expérimentaux avec l'hypothèse de l'action identique exercée par toute molécule sur l'abaissement du point de congélation du dissolvant, c'est-à-dire faire rentrer dans la règle les corps en apparence aberrants

D. Degré d'ionisation des diverses catégories de solutions d'électrolytes. — On peut déterminer, d'après les règles précédentes, le degré d'ionisation de solutions de diverses substances, et comparer ces degrés d'ionisation pour les différentes solutions, en considérant celles-ci à des concentrations moléculaires comparables.

On considère, par exemple, des solutions étendues. On prend ordinairement, pour type de ce cas, celles qui renferment aux environs de 0,1 du poids moléculaire de corps dissous dans 100 grammes d'eau — ou $\frac{1}{100}$ du poids moléculaire par litre. C'est ce que l'on appelle en chimie une solution *centi-normale*. On constate que, pour les sels alcalins à acide monobasique, le degré de dissociation d'une solution centi-normale est 0,84. Sur 100 molécules, il y en aurait 84 dissociées en leurs ions. Pour NaCl, on trouve 0,83 ; pour KCl, 0,85. D'autre part, pour les sulfates alcalins, c'est 0,74.

A la limite, on considère les solutions comme entièrement dissociées. La dissociation est complète pour toutes les solutions d'un degré de dilution égal ou supérieur à 1 molécule-gramme dans 1 mètre cube d'eau. Une solution contenant $58^{gr},5$ de chlorure de sodium dans 1 000 litres, ou $58^{mgr},5$ par litre est regardée comme complètement ionisée.

147. *Théorie du degré d'ionisation d'Arrhénius. — Théorie des abaissements partiels de Raoult.* — Nous venons d'exposer la théorie d'Arrhénius. C'est une première manière d'expliquer les faits cryoscopiques. Elle consiste à admettre la dissociation des molécules dissoutes et l'égalité d'action cryoscopique exercée par chaque molécule chimique ou électro-lytique.

La condition pour qu'il y ait accord de cette théorie avec les faits, c'est d'admettre pour les diverses solutions des degrés de dissociation divers.

— D'autre part, M. Raoult, en étudiant les solutions de sels différents, avait trouvé pour les *abaissements moléculaires à l'origine* des valeurs qui se groupaient autour de quatre chiffres principaux : 35 ; 40 ; 45 ; 19. Il s'est proposé

de rendre compte de la loi qui régit ces valeurs particulières. Il a vu que la variété de ces nombres semblait liée à la constitution électrolytique en radicaux électro-positifs et électro-négatifs, en *ions*. On peut retrouver la valeur numérique de l'abaissement moléculaire caractéristique (à l'origine) dans chaque cas. Il suffit pour cela de supposer le corps décomposé en ses éléments électro-chimiques et d'attribuer seulement deux valeurs, 15 et 8, aux éléments électro-positifs, selon qu'ils sont bivalents ou monovalents et de même 20 et 11 aux éléments électro-négatifs bivalents et monovalents.

Par exemple, l'abaissement moléculaire est :

1° Pour les radicaux électro-négatifs monoatomiques ou radicaux acides monovalents (Cl, Br, OH, AzO^3) :

$$\Delta_m = 20;$$

2° Pour les radicaux électro-négatifs biatomiques ou radicaux acides bivalents (SO^4, CrO^4, CO^3) :

$$\Delta_m = 11;$$

3° Pour les radicaux électro-positifs monoatomiques ou radicaux métalliques monovalents (H.K, Na, AzH^4) :

$$\Delta_m = 15;$$

4° Pour les radicaux électro-positifs biatomiques ou radicaux métalliques bivalents :

$$\Delta_m = 8.$$

Ces résultats peuvent s'exprimer de la manière suivante :

1° *Les radicaux bivalents produisent un abaissement moitié de celui des monovalents*;

2° *L'abaissement moléculaire limite d'un sel à acide fort ou à base forte est égal à la somme des abaissements moléculaires partiels des radicaux métalliques et des radicaux acides dont il est formé.*

Ces règles mnémoniques permettent par un calcul simple d'obtenir des nombres très approchés de ceux que donne l'observation.

Applications :

	Résultat calculé.	Résultat observé.
NaCl....................	15+20 =35	37,2
KOH....................	15+20 =35	36,8
HCl....................	15+20 =35	35,6
CrO^4K^2....................	11+ 2×15=41	39,5
CrO^4Mg....................	11+ 2× 8=27	29,5

Avec les bases ou les acides faibles, la règle ne donne plus de résultats exacts, mais des résultats trop forts.

Quels rapports y a-t-il entre cette hypothèse de Raoult et celle d'Arrhénius ?

L'origine de la théorie d'Arrhénius se trouve dans la règle empirique des abaissements partiels de Raoult. Celui-ci ne se proposait point, comme le premier, de rendre compte de la valeur des abaissements cryoscopiques dans toutes les circonstances, pour toutes les concentrations ; mais seulement dans une circonstance, pour une concentration limite. En d'autres termes, il n'avait en vue que les abaissements moléculaires à l'origine pour des solu-

tions de nature différente. Il ne pouvait être question de degrés différents dans la dissociation, ni d'égalité dans l'action cryoscopique de toute molécule. — Au contraire, avec les solutions qu'il envisageait, Raoult devait être conduit à regarder la dissociation comme complète, toute molécule comme ionisée, et chaque espèce de *molécule-ion* comme ayant une valeur différente d'abaissement cryoscopique.

D'ailleurs, ces deux conceptions viennent précisément se confondre dans le cas limite que Raoult avait en vue. Et, à cet égard, on peut dire que l'accord expérimental est mieux réalisé, dans ce cas particulier, par la règle de Raoult que par celle d'Arrhénius. L'abaissement moléculaire limite, trouvé par l'observation, ne s'accorde que grossièrement avec la supposition d'une action moléculaire identique de tous les ions et d'une dissociation complète. Les corps qui donnent deux ions devraient avoir un abaissement moléculaire double de l'abaissement moléculaire normal, 18,5. Il en est à peu près ainsi pour les électrolytes tels que NaCl, KCl, dont l'abaissement moléculaire limite est, en effet, voisin de 37 — (en réalité, 37,2 et 36,8). Mais parmi les corps donnant électrolytiquement trois ions (par exemple, les sels des métaux monovalents à acides bibasiques), on trouve *40* au lieu de 55,5; — pour les sels de métaux bivalents à acides bibasiques forts, tels que sulfate et chromate de magnésie, on trouve *19* au lieu de 37; et ainsi pour les autres catégories. De telle sorte, qu'en résumé, il faut ajouter à l'hypothèse première, insuffisante, des hypothèses nouvelles sur la condensation des molécules, pour expliquer ces valeurs aberrantes.

Ces deux conceptions étaient donc différentes dans les objets qu'elles avaient en vue et dans les moyens qu'elles mettaient en jeu; la théorie de Raoult supposant une ionisation identique, complète, et une action moléculaire cryoscopique différente, tandis que l'on admet aujourd'hui, avec Arrhénius, une ionisation différente et une action moléculaire identique.

148. Conséquences de la théorie d'Arrhénius. — Généralisation de la loi de Blagden et de la loi d'addition moléculaire. — Marche de l'ionisation. — Interprétation des courbes d'abaissement moléculaire. — En définitive, on dispose du *degré d'ionisation* pour corriger dans chaque cas les variations de l'abaissement moléculaire. Par l'attribution à chaque solution d'un degré d'ionisation convenablement choisi, on rend l'abaissement moléculaire de congélation constant pour toutes les solutions d'un même sel (ou autre électrolyte) et identique d'un sel à l'autre. Cette faculté d'abaissement moléculaire devient bien une propriété de la molécule, indépendante de sa nature particulière.

La loi de Blagden devient, elle aussi, tout à fait générale; ses écarts sont expliqués. Elle prend l'importance d'une loi fondamentale. L'abaissement moléculaire est constant; l'abaissement cryoscopique, pour une solution donnée, est proportionnel au nombre de molécules (entières ou ions) contenues dans un égal poids d'eau, 100 grammes par exemple.

Dans les limites où l'abaissement moléculaire est invariable, le degré d'ionisation l'est aussi. Pour les solutions typiques, comme le chlorure de

sodium, l'ionisation est sensiblement invariable dans une grande étendue, par exemple pour des solutions variant de 6 grammes à 6 décigrammes dans 100 grammes d'eau, c'est-à-dire du simple au décuple. L'ionisation, au moins pour ces solutions étendues modérément, ne marche donc pas progressivement.

L'ionisation marche progressivement lorsque l'abaissement moléculaire de congélation marche lui-même progressivement avec la dilution, c'est-à-dire lorsque la courbe s'élève à mesure qu'elle se rapproche de l'axe des ordonnées. Ce relèvement de la courbe est, à la vérité, une tendance générale que l'on constate chez toutes (**141**); il y est seulement plus ou moins marqué; il commence plus ou moins tôt, — d'ordinaire assez tard. Ceci veut dire que l'ionisation se produit peu ou point avec les solutions concentrées, qu'elle y est faible, peu progressive : c'est avec les solutions étendues qu'elle apparaît et se développe : elle y progresse avec la dilution, plus ou moins vite.

Les physico-chimistes admettent qu'à un certain degré de dilution la dissociation électrolytique est complète, que toutes les molécules sont ionisées. Ceci arriverait, en général, pour les solutions contenant le poids moléculaire du sel, *m* grammes dans un mètre cube d'eau. Il faudrait donc, d'après cela, que la courbe des abaissements moléculaires, qui a commencé à se relever en approchant à quelque distance de l'axe des ordonnées, continue ce mouvement au voisinage immédiat de cet axe.

Or, pour quelques expérimentateurs (Raoult), le tracé de la courbe dans les parties où l'observation est encore possible (concentrations voisines de 0,01 du poids moléculaire *m* pour 100 grammes d'eau) concorde avec cette direction ultime : la courbe se relève assez rapidement : le redressement ultime est amorcé. Pour d'autres (Ponsot), il n'en est plus de même; la courbe vient, en quelque sorte, couper carrément l'axe des ordonnées; elle a une allure qui rend improbable le relèvement asymptotique subit. L'ionisation croissant rapidement avec la dilution, et complète à la limite, serait une chimère.

On conçoit donc le grand intérêt de la discussion qui s'est engagée sur cette question, si particulière en apparence, du relèvement à l'origine des courbes d'abaissement moléculaire. Ce qui est en jeu, c'est la théorie de l'ionisation, ou, tout au moins, un point capital de cette théorie, à savoir l'augmentation rapide de l'ionisation pour les grandes dilutions, et la dissociation totale à la limite.

Il n'est pas certain que le débat puisse être tranché par de nouvelles mesures cryoscopiques, la précision de ces mesures devant diminuer à mesure que l'on opérera sur des solutions plus diluées.

Quant au relèvement de la courbe des abaissements moléculaires de l'autre côté, vers la droite, vers les concentrations croissantes, il n'indique plus rien sur le degré d'ionisation : nous venons de dire, en effet, qu'à ce degré de concentration, l'ionisation varie peu. En tout cas, on comprendrait mal qu'elle pût augmenter à mesure que la quantité du dissolvant diminue. Cet accroissement des ordonnées, c'est-à-dire des abaissements moléculaires, tient évidemment à des phénomènes d'une autre nature, tels que ceux d'hydratation et de condensation moléculaire qui caractérisent, comme on l'a souvent indiqué, les fortes concentrations.

Il y a plusieurs facteurs qui interviennent pour régler la grandeur de l'ordonnée de la courbe, c'est-à-dire de l'abaissement moléculaire $y = \frac{\Delta}{c} \times m = \frac{\Delta}{n}$. Le numérateur Δ croît en général avec la concentration : c'est un fait d'expérience. Quant au dénominateur n, nombre total des

molécules actives, il y a quatre facteurs qui peuvent le faire varier et par conséquent influencer, en sens divers, l'ordonnée. Ce nombre n des molécules actives dissoutes est augmenté par le fait de la concentration directement accrue, et aussi par le fait de l'hydratation qui, diminuant le dissolvant, accroît, lui aussi, indirectement la concentration; il est diminué par la diminution de l'ionisation et par les phénomènes possibles de condensation, de gémination moléculaire. On conçoit qu'il ne soit pas possible, *à priori*, de faire la part de ces facteurs opposés et de prévoir le résultat.

149. Accord entre les mesures osmotiques, tonométriques et cryoscopiques au point de vue particulier de l'ionisation et, enfin, au point de vue général. — Il faut noter que le *degré d'ionisation d* et le coefficient de correction i, qui sont d'ailleurs liés par la relation $d=\frac{i-1}{p-1}$ (p étant le nombre d'ions fournis par une molécule dissociée), peuvent être déterminés aussi bien par les mesures osmotiques, tonométriques ou cryoscopiques, sans compter les mesures de conductibilité électrique.

Dans tous les cas, ils s'obtiennent d'une manière sensiblement analogue :

— 1° Dans le cas des mesures osmotiques, on suppose déterminée par l'expérience la pression osmotique de la solution, π_1 ; on connaît la pression théorique donnée par la formule de Van t'Hoff (Voy. VIII, n° ***85***) : le rapport de celle-ci à celle-là donne le coefficient i. Le degré de dissociation s'en déduit par la formule

$$d=\frac{i-1}{p-1}. \qquad (\mathbf{86},\mathrm{X}$$

2° Dans les cas des mesures tonométriques, il faut de même connaître la dépression tonométrique réelle de la solution et la comparer à la valeur théorique : le rapport de celle-ci à celle-là donne le coefficient i d'où l'on tire le degré d'ionisation. La première est obtenue par l'expérience qui fournit la tension de vapeur f' de la solution; l'expérience fournit encore, si on ne la connaît déjà par les tables, la tension de vapeur du dissolvant (eau) f à la même température (celle d'ébullition) : avec ces deux éléments, on a facilement l'abaissement moléculaire expérimental $\rho=\frac{f-f'}{f}\frac{m}{c}$. — m étant le poids moléculaire du corps dissous et c la concentration de la solution.

La seconde valeur, la valeur théorique, est fournie par la formule générale bien connue

$$\frac{f-f'}{f}\cdot\frac{m}{c}=\frac{\mathrm{M}}{100}. \qquad (\mathbf{106},\mathrm{XIX})$$

où M est le poids moléculaire du dissolvant. Dans le cas des dissolutions aqueuses où $\mathrm{M}=18{,}5\ldots\ \frac{\mathrm{M}}{100}=0{,}185$, cette formule devient : $\frac{f-f'}{f}\frac{m}{c}=0{,}185$.

Le rapport de la première valeur à la seconde, 0,185, est, par définition, le *coefficient de correction i*. Connaissant i, on tire le degré de dissociation d de la formule

$$d=\frac{i-1}{p-1}. \qquad [\mathbf{114},(\beta)]$$

ou directement de la connaissance de ρ, par l'expression

$$d=\frac{a}{n}=\frac{\rho-0,185}{0,185\times(p-1)}.$$

— 3° Dans le cas des mesures cryoscopiques, la marche est encore la même. Il faut connaître l'abaissement cryoscopique relatif à la solution considérée, et le comparer à la valeur théorique : le rapport de l'un à l'autre donnera le coefficient de correction i, d'où l'on tirera le degré d'ionisation.

La mesure cryoscopique directe fournit l'abaissement Δ de la solution considérée (concentration c, poids moléculaire m) : de là, on déduit l'abaissement moléculaire expérimental

$$P=\frac{\Delta}{c}\times m.$$

L'abaissement moléculaire théorique est, d'autre part, $\Delta_m=18,5$.

Le rapport de la première valeur à la seconde est, par définition, le coefficient de correction i. On en tire le degré de dissociation d par la formule $d=\frac{i-1}{p-1}$; on peut le tirer directement de la connaissance de P par la formule

$$d=\frac{a}{n}=\frac{P-18,5}{18,5\times(p-1)}$$

— 4° Dans le cas des mesures de conductibilité électrique, il faut, de même, mesurer, en premier lieu, le pouvoir de conduction électrique de la solution ; et, en second lieu, la valeur théorique limite de ce pouvoir répondant au cas de dilution extrême ; le rapport de ces deux valeurs fournit le degré d'ionisation (**88**)

$$d=\frac{\mu_v}{\mu_\infty}$$

On constate, d'une façon générale, l'accord très satisfaisant des valeurs obtenues par ces différentes méthodes, soit pour le coefficient de correction i, soit pour le degré de dissociation d. C'est un nouvel argument en faveur de la théorie ; et ce n'est pas le moindre.

De Vries (1) a comparé ses coefficients isotoniques, obtenus par la méthode osmotique (plasmolytique) aux valeurs de i déduites des expériences cryoscopiques de Raoult. L'accord est à peu près satisfaisant. Les chiffres ne sont pas identiques : mais leur rapport ne varie que de 0,88 (cas du ferrocyanure de potassium) à 1,19 (cas de l'oxalate de potassium). Ce sont les écarts extrêmes. La concordance est encore meilleure lorsque l'on compare les résultats osmotiques de De Vries aux mesures cryoscopiques de Loomis et de Ponsot La différence, dans la plupart des cas, est inférieure à 10 p. 100 — et c'est là précisément la limite d'approximation que permet la méthode de la plasmolyse. Par exemple, avec les solutions des sels suivants, KCl,

(1) De Vries, Osmotische Versuche (*Zeitschr. f. physik. chemie*, II, 1888, p. 415) — et Isotonische Koëfficienten (*Ibid.*, III, 1889, p. 103). — Van t'Hoff et Reicher, Beziehung zwischen osmotischem Druck, Gefrierpunkts erniedrigung und electrischer Leitfahigkeit (*Zeitschr. f. physik chemie*, III, 1889, p. 198).

NaC, AzH^4Cl, $NaAzO^3$, $MgSO^4$, K^2SO^4, le rapport du nombre i déterminé par l'osmose, au nombre i déterminé par la cryoscopie, est exactement égal à 1,03 ; pour $CaCl^2$, ce rapport est égal à 1,02 ; avec $MgCl^2$ il s'élève à 1,04. Étant donnée l'imprécision de la méthode osmotique, cette coïncidence peut être regardée comme parfaite. — Avec le sucre, l'acide citrique et l'acide tartrique, le rapport des chiffres fournis par les deux méthodes est de 0,90 à 0,93.

De même, la comparaison des résultats osmotiques de De Vries aux mesures de conductibilité électrique de Kohlrausch aboutit à la conclusion de l'accord satisfaisant.

On a vu, d'ailleurs, au cours de ce travail, le parallélisme, en quelque sorte parfait, de ces trois chapitres de l'étude des solutions : l'osmose, la tonométrie et la cryoscopie. Ce sont les mêmes lois et les mêmes interprétations : il ne faut point s'étonner de l'accord des mesures.

150. *Application de la Cryoscopie à la détermination des poids moléculaires.* — Les propriétés des solutions qui sont des fonctions moléculaires ont été utilisées en chimie pour la détermination des poids moléculaires. C'est la principale de leurs applications.

Nous avons vu qu'on a fait servir à cet usage les mesures tonométriques (**107**), soit celle de la dépression de vapeur, soit celle de l'élévation du point d'ébullition d'une solution contenant c grammes du corps dans 100 grammes d'un dissolvant convenablement choisi :

1° On mesure, à la température d'ébullition — ou à toute autre, par exemple à 0°, — la tension de vapeur de la solution f' et celle du dissolvant pur f, et l'on a

$$m = \frac{M}{100} . c . \frac{f}{f - f'} \qquad \text{(XX)}$$

où m est le poids moléculaire cherché, M le poids moléculaire connu du dissolvant.

Dans les cas où le dissolvant est l'eau, on a

$$m = 0.18 . c . \frac{f - f'}{f} . \qquad \text{(XXI)}$$

Avec les autres dissolvants, 0,18 serait remplacé, pour la benzine par 0,79 ; pour l'éther, par 0,74 ; pour l'acétone, par 0,59 ; pour l'acide formique, par 0,71 ; pour l'acide acétique, par 0,97.

2° On mesure la température d'ébullition T du dissolvant et l'élévation du point d'ébullition Γ de la solution.

On a : [**109**, formule (XXIII)]

$$m = Q . c . \frac{1}{\Gamma . T}$$

où Q a les valeurs suivantes : pour l'eau, 5°,2 ; pour l'alcool, 11°,5 ; pour l'éther, 21°,5 ; pour l'acétone, 16°,7 ; pour la benzine, 26°,7 ; pour l'acide acétique, 31°,3 ; pour l'acide formique, 23°,7.

Mais ce sont surtout les mesures cryoscopiques qui sont employées à cet usage par les chimistes.

On a vu (*136*) que si l'on considère la solution contenant c grammes du corps de poids moléculaire m dans 100 grammes de dissolvant et que l'on mesure l'abaissement Δ du point de congélation, on avait la relation

$$\Delta_m = \Delta \frac{m}{c}$$

d'où

$$m = \Delta_m \frac{c}{\Delta} \qquad (\varepsilon)$$

dans laquelle Δ_m représente l'abaissement moléculaire. Celui-ci est considéré comme une constante, pour un même dissolvant.

C'est cette loi de la fixité d'abaissement moléculaire de congélation qui devient le principe des applications. Pour toutes les solutions aqueuses, par exemple, $\Delta_m = 18{,}5$. La formule précédente devient alors $18{,}5 = \Delta_m \frac{m}{c}$ et fournit une valeur du poids moléculaire

$$m = 18{,}5 \frac{c}{\Delta}. \qquad (\delta)$$

Pour les solutions dans l'acide formique, le chiffre de l'eau 18,5 sera remplacé par 29 ; pour les solutions acétiques, par 39 ; pour les solutions benzéniques, par 49 ; enfin, par 70 pour les solutions dans la nitro-benzine ; par 74 pour les solutions phénoliques ; par 118 pour les solutions dans le bromure d'éthylène. Ces chiffres représentent les valeurs de l'abaissement moléculaire normal correspondant à ces divers dissolvants.

La détermination du poids moléculaire par le *procédé de Raoult* exige donc seulement une mesure cryoscopique : celle de l'abaissement Δ correspondant à la solution de concentration c. L'opération se fait au moyen de l'appareil usuel de Beckmann, de la manière indiquée plus haut (*128*). La concentration c doit être telle que l'abaissement Δ qui dépend de cette concentration soit d'environ 1 degré.

M. Raoult a déterminé par la méthode cryoscopique les poids moléculaires d'un grand nombre de composés organiques. Les opérations de ce genre sont devenues très fréquentes en chimie organique et même en chimie minérale ; elles ont porté sur plus de deux mille composés dissous dans une centaine de dissolvants. Les résultats ont été généralement concordants avec ceux que fournissent les autres méthodes. Dans quelques-uns des cas, assez rares, où l'on a constaté une discordance, celle-ci a fourni des indications, parfois intéressantes, sur la manière dont le corps examiné se comporte dans ses solutions.

Exemple. Poids moléculaire de l'éther sulfurique : 74.

1° Solution benzénique de concentration 2,72.

La solution contient $2^{gr},72$ d'éther pour 100 grammes de benzine.

Le point de congélation de cette solution est trouvé $-1^{o},826$. L'abaissement $\Delta = 1{,}826$

D'autre part, la constante d'abaissement moléculaire normal pour la benzine est $\Delta_m = 49$.

La formule $m = \Delta_m \frac{c}{\Delta}$ conduit à

$$m = 49 \; \frac{2,72}{1,826} = 73.$$

2° Solution acétique de concentration 1,51.

La solution contient 1gr,51 d'éther pour 100 grammes d'eau. L'expérience donne pour le point de congélation de cette solution — 0°,8. L'abaissement $\Delta = 0,8$.

D'autre part, la constante (abaissement moléculaire normal) pour l'acide acétique est 39. $\Delta_m = 39$.

La formule $m = \Delta_m \frac{c}{\Delta}$ conduit à la valeur

$$m = 39 \; \frac{1,51}{0,8} = 74.$$

La méthode cryoscopique donne donc pour l'éther des nombres 73 et 74 très proches du poids moléculaire réel 74. — Toutefois, il faut remarquer que si l'on avait opéré avec une solution aqueuse, on aurait trouvé un nombre plus fort. Par exemple, avec de la solution aqueuse de concentration 4,47, on aurait trouvé un abaissement de congélation de 1°,05 et un poids moléculaire, pour l'éther, de 80.

Il faut examiner brièvement le degré d'exactitude et le degré de précision de la méthode cryoscopique, questions qui sont liées aux circonstances de son emploi.

151. Conditions d'utilisation de la méthode cryoscopique. — a. ***Solutions aqueuses.*** — b. ***Organiques.*** — c. ***Benzéniques.*** — d. ***Métalliques.*** — Le degré d'exactitude du procédé cryoscopique dépend, entre autres conditions, du degré d'exactitude de la relation qui lui sert de base. Cette relation (***150,*** ε) suppose que l'abaissement moléculaire est invariable pour toutes les solutions faites avec le même dissolvant. Or cette supposition n'est pas exacte. L'abaissement moléculaire n'est pas identique pour les diverses concentrations d'une même substance et il ne l'est pas pour les diverses substances. De là des causes d'erreur : il faut les apprécier et les écarter, ou en tenir compte.

1° En ce qui concerne les concentrations, elles influent d'une manière différente sur l'abaissement moléculaire, selon la substance dissoute. Ces variations sont plus ou moins considérables quand on passe de l'une à l'autre. Ces variations sont les moindres possibles quand on prend des concentrations convenables, c'est-à-dire telles que les abaissements soient voisins de 1° si on opère avec l'eau, qu'ils soient compris entre 1°,5 et 2°, si l'on opère avec l'acide acétique, etc. (***137***). On peut alors se contenter d'une seule détermination.

On pourra faire, avec avantage, deux déterminations si l'on opère avec un appareil plus précis, et surtout si l'on sort des limites précédentes. Les nombres caractéristiques des abaissements moléculaires normaux : 18,5, 29,... 39,... 49,... 70,... 74,... 118 se rapportent aux abaissements limites à l'origine b (***138***). Si donc, on a fait deux déterminations d'abaissement du point de congélation Δ_1, Δ_2 pour les solutions de concentration c_1 et c_2, l'abaissement moléculaire limite à l'origine b sera donné par la formule

$$b = m\Delta_1\Delta_2 . \frac{\frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_1}}{\Delta_1 - \Delta_2}$$

et c'est de là que l'on tirera m.

2° En ce qui concerne les substances auxquelles la méthode est appliquée, il faut distinguer, suivant la nature du dissolvant. Il faut considérer à part les solutions aqueuses, les solutions organiques en général, les solutions benzéniques et, enfin, les solutions métalliques.

A. Solutions aqueuses. — Les matières organiques sont à peu près les seules qui, en solutions aqueuses, fournissent un abaissement moléculaire limite normal. En principe, les sels, les acides forts, les bases fortes, et en général les électrolytes sont exclus ; leurs poids moléculaires ne peuvent être obtenus par la méthode cryoscopique. On a expliqué précédemment que ces corps produisaient une majoration de l'abaissement moléculaire (**144, 145**).

La méthode est, cependant, encore applicable à condition de tenir compte de l'ionisation. Étant donnée une solution saline, par exemple, on en déterminera d'abord le degré d'ionisation (**149**). On pourra par conséquent calculer l'abaissement partiel du degré de congélation qui est dû à la présence des ions dans la solution. La détermination directe fournit l'abaissement total dû à l'ensemble des ions et des molécules. La différence [en vertu de la loi des mélanges (**160**)] donnera l'abaissement du point de congélation dû aux véritables molécules, soit Δ. Alors la formule $m = \Delta_m \dfrac{c}{\Delta}$ (dans laquelle Δ_m est la constante 18,5, c le poids correspondant au nombre des molécules entières dissoutes dans 100 grammes d'eau, Δ l'abaissement dû aux véritables molécules) fera connaître le poids moléculaire du sel (1).

Ces poids se confondent avec ceux que fournit la méthode chimique. Il y a quelques exceptions, qui révèlent nécessairement des condensations, des géminations moléculaires, en un mot, un état des molécules qui n'est point l'état libre. Ceci arrive pour l'acide chromique qui a un poids moléculaire double de celui adopté : ses molécules se réuniraient par deux dans la solution. De même pour le sulfate de zinc, le sulfate de magnésie : la solution s'accompagne à la fois de dissociation en ions et de polymérisation.

B. Solutions organiques. — Avec les autres dissolvants, acide acétique, alcool, éther, acétone, les choses se passent régulièrement ; les phénomènes cryoscopiques, comme les phénomènes tonométriques, ébullioscopiques, etc., sont extrêmement simples. Les abaissements moléculaires de tous les corps dissous ont la valeur normale, à la condition d'éviter les dilutions extrêmes et de s'en tenir aux concentrations supérieures à une demi-molécule par litre. On a vu qu'il n'y avait point d'ionisation (**120**). L'ionisation serait un fait particulier au dissolvant *eau*.

Raoult a étudié un grand nombre de sels en solution alcoolique, et trouvé des nombres correspondant exactement aux formules chimiques adoptées. Il n'y a eu de résultat aberrant que pour l'iodure de sodium. Le poids moléculaire cryoscopique est inférieur au nombre chimique. Le résultat s'expliquerait en supposant que ce sel subit dans l'alcool un commencement d'ionisation.

Les solutions éthérées des sels ont été étudiées par Lespieau (méthode tonométrique) ; les résultats ont été corrects, sauf pour le perchlorure de fer.

(1) M.-F. Raoult, Les nouveaux enseignements de la cryoscopie et de la tonométrie (*Revue des sciences*, 30 août 1900).

Dutoit et Friedrich ont examiné les solutions acétoniques. Verner a employé les solutions de dix-sept sels différents, dans des dissolvants tels que la pyridine, le sulfure d'éthyle, le sulfure de méthyle, la paratoluidine, le benzonitrile. Dans tous les cas, les poids moléculaires se sont trouvés corrects et d'accord avec les poids théoriques répondant aux formules chimiques.

Au contraire, les solutions dans la benzine présentent des particularités importantes.

C. Solutions benzéniques. — Avec la benzine, l'exclusion porte sur les alcools, les phénols et les acides.

Les acides gras et autres acides monobasiques dissous dans la benzine et soumis aux mesures cryoscopiques fournissent un poids moléculaire à peu près double de celui qui est fourni par les méthodes chimiques.

Ce résultat peut recevoir une interprétation très simple. L'abaissement moléculaire $\Delta_m = \Delta \frac{m}{c}$ (où m est le poids de la molécule chimique), au lieu d'être 49 comme il arrive pour la plupart des substances dissoutes, est 25. Il y a environ deux fois moins de particules actives que de véritables molécules chimiques. En dissolution benzénique, la particule d'acide gras est double de la molécule chimique. Ce qu'il y a de remarquable, c'est que ce résultat est vrai non seulement des solutions concentrées, mais même des solutions étendues où le dissolvant tend cependant à dissocier le corps dissous. M. Raoult fait observer que l'anomalie se produit, pour ces corps, à l'état de vapeur de même qu'à l'état dissous. Les vapeurs saturées d'acide acétique et autres acides gras monobasiques ont une densité bien supérieure à la densité théorique. La particule physique de vapeur (molécule physique) a un poids beaucoup plus élevé que la molécule chimique véritable.

Les alcools dissous dans la benzine donnent des résultats encore plus aberrants, mais tout aussi faciles à interpréter. Lorsque la solution est très étendue, les choses se passent régulièrement. L'abaissement moléculaire est normal, l'abaissement cryoscopique correspond au nombre des molécules chimiques contenues dans la solution. Lorsque la solution se concentre, il n'en est plus de même; l'abaissement cryoscopique observé correspond à un nombre de molécules bien plus petit que celui qu'indique la concentration évaluée en molécules chimiques. Les poids moléculaires appréciés par la cryoscopie correspondent à des particules condensées; ils arrivent à être le sextuple du poids moléculaire chimique. Cette condensation moléculaire, réalisée par la dissolution, est mieux marquée pour les alcools primaires que pour les alcools secondaires et pour ceux-ci mieux que pour les alcools tertiaires (Biltz).

M. Raoult a roposé d'utiliser cette particularité pour l'analyse. On peut distinguer par là les alcools des acétones, de l'aldéhyde, qui en solution benzénique se comportent régulièrement à toute concentration, donnant un abaissement moléculaire normal de 49, et un poids moléculaire invariable.

D. Solutions métalliques. — On peut dissoudre les métaux les uns dans les

autres, au moins à la température de fusion. Ramsay, en 1889, a étudié les solutions d'un grand nombre de métaux dans le mercure et déduit de ses mesures (tonométriques) les poids moléculaires des métaux dissous, qui ont été trouvés corrects.

Heycock et Neville ont procédé par fusion. Ils ont employé comme dissolvants des métaux faciles à liquéfier, sodium, étain, bismuth, cadmium, plomb. Ils notaient le point de solidification de ces métaux purs. Puis, ils y dissolvaient d'autres métaux, et notaient le nouveau point de solidification. Par exemple, dans le plomb fondu on dissout facilement de petites quantités de zinc, étain, antimoine, cuivre ou argent. L'addition du corps capable de se dissoudre a toujours pour effet d'abaisser le point de solidification du dissolvant (*135*). On détermine cet abaissement, comme on fait en cryoscopie ordinaire.

De cette seule mesure on pourrait déduire le poids moléculaire, s'il était permis de considérer l'abaissement moléculaire comme parfaitement fixe. A défaut de cela, on doit envisager l'abaissement moléculaire limite. Il faudrait donc connaître la valeur normale de cet abaissement moléculaire pour chaque dissolvant métallique. Celle-ci pourrait se déduire des courbes d'abaissement moléculaire pour des concentrations différentes (*137*). Mais, plus simplement, les expérimentateurs l'ont tirée de la formule théorique de Van t'Hoff (*166*). Ayant ainsi la valeur de Δ_m dans la formule $\Delta_m = \Delta \frac{m}{c}$, on conclut la valeur du poids moléculaire m. On a trouvé, de cette manière, pour les poids atomiques des métaux, des valeurs concordantes avec les poids moléculaires connus. Les alliages se comportent donc, on peut le remarquer en passant, comme de simples dissolutions.

152. Degré de précision de la méthode cryoscopique pour les poids moléculaires. — Dans les cas où il n'y a pas d'irrégularités de la nature de celles qui viennent d'être signalées, les poids moléculaires peuvent être déterminés, d'une manière assez approximative, par la méthode cryoscopique. L'erreur peut varier autour de 1 p. 100. Elle s'élève quelquefois plus haut et jusqu'à 5 p. 100 et au delà.

Même dans ces cas défavorables, la précision est encore suffisante. En effet, ce que l'on demande à la méthode cryoscopique, c'est, en général, de décider, entre divers multiples d'un nombre déterminé, quel est celui qu'il faut choisir pour poids moléculaire; si c'est m, $2m$, $3m$, etc.

153. Cas dans lesquels la détermination cryoscopique est indiquée spécialement. — La méthode cryoscopique peut s'employer comme auxiliaire de la méthode des densités de vapeur, ou au besoin comme contrôle de celle-ci lorsque cette dernière n'est plus applicable, lorsqu'il s'agit de composés qui ne sont pas volatils, par exemple : le procédé cryoscopique possède alors une valeur toute particulière.

On l'a employée à la détermination des poids moléculaires des sucres, des hydrates de carbone, et même des matières albuminoïdes. — Pour le saccharose, le glucose, le lactose, les poids moléculaires coïncident avec ceux

qu'indique la théorie atomique (Raoult). Pour le maltose, l'arabinose, le xylose, le raffinose, la méthode cryoscopique a été utilisée par Brown et Morris. Dans l'étude des sucres et de leurs dérivés, c'est elle qui a fourni des indications sur les poids moléculaires à MM. Maquenne, Tanret, Tollens, von Klobukow, Mayer, Wheeler. Pour les hydrates de carbone, la difficulté augmente à cause de l'incertitude où l'on est sur leur pureté et de la faiblesse de l'abaissement de congélation qu'ils produisent. Brown et Morris ont trouvé pour l'amylo-dextrine, le poids moléculaire 3268 qui répond à la formule $(C^6H^{10}O^5)^{14}$ et pour la malto-dextrine, le poids 1026 qui répond à $(C^6H^{10}O^5)^6$: ce sont des poids et des états de condensation bien supérieurs à ce que l'on croyait.

154. Irrégularités de la méthode cryoscopique pour les poids moléculaires. Objections à la théorie d'Arrhénius. Théorie des modules. — Il existe dans la science, au delà de deux mille déterminations de poids moléculaires par la méthode cryoscopique. Dans leur ensemble, ces résultats se sont montrés corrects, concordants avec les résultats obtenus par les autres méthodes et conformes aux valeurs théoriques. Quant aux exceptions et irrégularités, elles ont été considérées à deux points de vue différents, par les partisans et les adversaires de la théorie de l'ionisation et de la condensation moléculaire.

— Les adversaires de la doctrine d'Arrhénius et Raoult adressent à la méthode cryoscopique les reproches suivants (Ponsot) :

1° L'arbitraire de son application. Théoriquement, il faudrait, pour une substance donnée dissoute dans un dissolvant, faire non pas une seule détermination avec un certain degré de concentration, mais un très grand nombre de déterminations avec des concentrations diverses ; puis, construire la courbe des abaissements moléculaires correspondant à ces concentrations, et par suite à des points de congélation différents. Cela fait, il y aurait alors incertitude complète sur la solution à choisir pour en adopter l'abaissement moléculaire, et en tirer le poids moléculaire cherché.

Et de fait, depuis les débuts, on a beaucoup varié à cet égard. Dans les premiers temps, on recommandait de prendre les abaissements entre — 2° et — 4° ; deux déterminations dans cet intervalle devaient donner l'abaissement moléculaire réel, et par conséquent le poids moléculaire véritable. Puis, ayant reconnu que la courbe se rapprochait mieux d'une droite et fournissait des valeurs moins différentes pour l'abaissement moléculaire, entre — 2° et — 1°, on a conseillé de substituer ces limites aux précédentes ; c'est-à-dire, de cryoscoper deux solutions de concentrations telles qu'elles se congèlent entre — 2° et — 1° et de prendre la moyenne. Enfin, aujourd'hui, on se contente d'une seule détermination dans le voisinage de — 1°. Ces variations correspondent à la diversité des opinions qui se sont produites sur l'allure générale des courbes d'abaissement cryoscopique (***138-143***).

Toujours est-il que si, dans certains cas, ces diverses manières d'opérer ne font que modifier légèrement et améliorer les valeurs, il y en a d'autres, par exemple celui des corps aberrants, où elles peuvent conduire à des poids moléculaires variant beaucoup. Même entre des limites peu

étendues, on constate des variations du quart de la valeur. Ainsi, pour le rhamninose, l'abaissement moléculaire varie de 18 à 25 pour des variations du point de congélation, de — 0°,3 à — 0°,04. Les variations peuvent aller du simple au double — ou même du simple au septuple (dissolution de l'alcool dans la benzine (**151**, C). Des oscillations d'une telle amplitude interdisent, non seulement de fixer les poids moléculaires, mais même de fixer le choix entre deux valeurs multiples, entre lesquelles on hésiterait.

Il y a enfin des cas où ce n'est pas en se rapprochant successivement de — 4° à — 1°, c'est-à-dire en prenant des solutions de plus en plus étendues, que l'on se rapproche du véritable poids moléculaire; mais, au contraire, en s'en écartant de plus en plus. C'est ce qui arrive pour les solutions de l'acide oxalique dans l'eau — et du chloral dans l'acide acétique. Pour l'acide oxalique, le poids moléculaire varie de 52,21 à 69,4 pour des solutions de concentrations telles que le point de congélation varie de — 0°,045 à — 0°,915.

2° Le second reproche, c'est l'indétermination du dissolvant. — Il n'y a pas de règle précise pour l'emploi des dissolvants. Les uns sont rejetés comme *dissociants*, par exemple l'eau pour les sels, qui y subiraient une dissociation électrolytique. D'autres sont rejetés comme *associants*, par exemple l'eau pour le sulfate de magnésie, la benzine pour l'alcool, etc.

Enfin, on sait qu'avec un dissolvant déterminé on peut obtenir deux valeurs pour l'abaissement moléculaire, l'une normale, l'autre anormale (**139**).

Ces difficultés ont amené quelques physiciens à n'accorder qu'une confiance relative à la méthode cryoscopique. La même prévention se manifeste, d'ailleurs, contre la théorie de l'ionisation en général (**138**). La méthode cryoscopique en est l'application de l'hypothèse fondamentale d'Arrhénius qui attribue l'égalité d'action à toutes les molécules. Celle-ci entraîne l'existence de différents degrés de dissociation pour des solutions qui diffèrent soit par leur nature, soit par leur concentration; cette différence, dans la dissociation, permet de conserver l'action égale aux éléments dissous, en faisant varier le nombre. La théorie de l'ionisation est sujette, d'autre part, à quelques objections assez graves au point de vue de l'énergétique chimique. Cet ensemble d'arguments a déterminé quelques auteurs, dont M. Chroustchoff et M. Ponsot, à rejeter la théorie tout entière. Les propriétés des solutions ne seraient point purement et simplement additives. Toutes les molécules n'auraient pas un égal pouvoir osmotique, tonométrique, cryoscopique : elles auraient des pouvoirs différents. Les pouvoirs ne varieraient pas forcément d'un corps à un autre; ils seraient les mêmes pour tous les corps appartenant à un même *groupe naturel*, — le principe du groupement naturel restant à fixer; — en un mot, ce serait, non pas l'égalité absolue, mais l'égalité à un coefficient constant près. Les solutions auraient, en un mot, chacune un *module*, c'est-à-dire un coefficient d'action différent de 1 et variable par catégories de corps. C'est en revenir à l'hypothèse de De Vries, à l'idée de Coppet, et à la conception primitive de Raoult. Les coefficients isotoniques de De Vries sont des modules.

L'avenir décidera de la valeur de ces vues. Il nous apprendra si la con-

ception d'Arrhénius et de l'école physico-chimique qui attribue tout à la molécule, à l'unité moléculaire, et rien à sa spécificité est ou n'est pas trop absolue; et, s'il faut ou non, avec d'autres physiciens, la corriger en y faisant intervenir, la nature des corps, c'est-à-dire en y joignant la notion de la *spécificité par catégories;* en un mot adopter la théorie des modules convenablement développée.

155. Résultat général des déterminations des poids moléculaires. Loi de Raoult et van t'Hoff. — Au contraire, les partisans de l'hypothèse d'Arrhénius ne voient dans les irrégularités et les aberrations signalées plus haut que des faits très naturels, et qui fournissent précisément des renseignements extrêmement précieux sur la constitution intime des solutions. Il y a réellement des dissolvants qui sont des *dissociants*. L'eau en est le type, par rapport aux sels et aux électrolytes en général. — Il y a des dissolvants qui sont des *associants* pour beaucoup de corps dissous, c'est-à-dire qui polymérisent en quelque sorte leurs molécules et les condensent en molécules plus grosses.

La méthode cryoscopique, envisagée de cette façon, devient (comme, d'ailleurs, l'osmose ou la tonométrie) un moyen de pénétrer dans l'examen de la constitution de la matière. En admettant comme vérité fondamentale que l'action cryoscopique, tonométrique, osmotique, est identique pour toute particule libre du corps dissous, on saura que cette particule est la molécule chimique elle-même, lorsque l'évaluation de l'effet cryoscopique conduira au poids moléculaire théorique (déduit de la densité de vapeur). C'est ce qui arrive pour les substances organiques en solution dans l'eau et dans la plupart des autres solvants. On en tirera cette conséquence queles substances organiques existent à l'état de molécules chimiques dans leurs solutions comme dans leurs vapeurs.

La même chose est vraie pour les métalloïdes et les métaux.

On a déterminé les poids moléculaires des métalloïdes en solution, par la méthode cryoscopique. Rooseboom, Paterno et Nasini ont trouvé ainsi que les poids moléculaires du chlore et du brome en solution dans l'eau correspondaient aux valeurs Cl^2,Br^2, c'est-à-dire à deux atomes unis. Ces corps simples existent donc en solution au même état que dans la condition gazeuse. De même, les travaux de Paterno, Nasini, Gautier, Charpy, Beckmann, Krüss, Thièle, Oddo, Serra, rapprochés les uns des autres, montrent que l'iode existe dans tous ses dissolvants avec le poids moléculaire correspondant à I^2, comme il arrive pour ses vapeurs. De même encore, Raoult a montré que l'oxygène existe en dissolution dans l'eau avec la même constitution atomique qu'à l'état gazeux. Le soufre existe dans ses dissolutions avec le poids moléculaire S^8 qui est celui où il existe, en vapeur, aux basses températures (Bleier et Kohn). De même le phosphore a le poids moléculaire P^4 aussi bien à l'état dissous qu'à l'état gazeux.

Pour les métaux, Ramsay, Heycock et Neville ont montré, en les dissolvant les uns dans les autres, qu'ils existent dans leurs dissolutions avec le poids atomique. Or, le mercure, le cadmium et le zinc, existent dans leurs vapeurs

à l'état d'atomes. Ils y sont donc au même état que dans leurs solutions

Il résulte de là qu'à des températures identiques, les poids moléculaires d'un corps à l'état gazeux et à l'état dissous sont les mêmes. En d'autres termes, le corps est au même état de division particulaire dans le gaz ou la vapeur et dans la solution. C'est là une confirmation remarquable des vues de Van t'Hoff d'après lesquelles le *corps dissous est réellement à l'état gazeux* (**79**).

Raoult a donné une dernière expression, extrêmement générale, à ces résultats. On vient de voir que la particule du corps gazeux et celle du corps dissous ont même poids (poids moléculaire), et, par conséquent, même masse. On sait d'autre part que la pression osmotique est égale à la pression gazeuse du corps dissous supposé gazéifié dans un volume égal à celui de la solution (**73**) : on peut conclure (en adoptant la théorie cinétique qui attribue la pression aux chocs des molécules contre la paroi du contenant) que la force vive de translation est la même dans les deux cas. On est conduit ainsi à l'expression de la loi très généraledans laquelle se condensent et se résument toutes les lois particulières de l'osmose, de la tonométrie et de la cryoscopie. L'énoncé en est dû à Raoult; c'est une extension de celui de Van t'Hoff.

Loi générale. — *A une même température ou à des températures peu différentes, l'acte de la dissolution et l'acte de la vaporisation réduisent chaque corps en particules actives qui ont la même masse et la même force vive de translation à l'état gazeux et à l'état dissous dans un dissolvant quelconque.*

Exceptions. Cas particuliers. — Quant aux prétendues exceptions, et aux faits aberrants, ce sont de simples cas particuliers : ils indiquent que le corps dissous, au lieu de rester à l'état de molécules de vapeur ou de molécules chimiques comme le veut la loi générale, a subi des dissociations ou des condensations et quelquefois les deux effets simultanément. Ces phénomènes n'ont rien que de très vraisemblable, et la polymérisation chimique a familiarisé les expérimentateurs avec leur réalité.

Aux exemples cités plus haut d'exceptions relatives aux électrolytes, aux solutions d'alcools ou d'acides dans la benzine, etc., on peut en ajouter quelques autres. C'est ainsi que le perchlorure de fer dissous dans l'éther ou l'acétone a un poids moléculaire correspondant à $FeCl^3$ au lieu de Fe^2Cl^6. Sa molécule serait dédoublée dans ces dissolvants, dissociants pour elle. Même chose pour le ferricyanure de potassium correspondant à FeK^3Cy^6 et non à $Fe^2K^6Cy^{12}$; de même encore pour le permanganate de potassium $KMnO^4$ au lieu de $K^2Mn^2O^8$.

Les données cryoscopiques fournissent de nombreuses applications à la chimie, à la physique et à la biologie. Nous indiquerons seulement les principales.

Nous renvoyons pour le surplus, au chapitre spécial des *Applications* (Chap. V).

156. *Application de la règle des abaissements cryoscopiques partiels de Raoult à la détermination de la basicité des acides.* — Soit un acide A. Considérons-en le sel potassique ou sodique, afin de pouvoir appliquer la règle des abaissements cryoscopiques partiels (***147***) : l'abaisse-

ment moléculaire d'un sel à base forte est égal à la somme des abaissements moléculaires partiels des radicaux métalliques et des radicaux acides dont il est formé. Ici l'abaissement du radical métallique monovalent est égal à 15. On doit avoir :

$$\Delta_m = 15 + \text{abaissement moléculaire de l'acide.} \qquad (1)$$

Prenons le poids de sel c grammes qui contient l'atome de potassium ($K = 39$) : l'analyse nous apprend qu'il renferme p grammes d'acide. On a $c = 39 + p$. Dissolvons ce poids c dans 100 grammes d'eau, et cryoscopons la solution. Soit Δ l'abaissement observé du point de congélation.

Si l'acide est monobasique, la molécule du sel aura pour formule (KA') où $K = 39$ et $A' = p$. Le poids moléculaire m du sel se confond alors avec le poids c. On a $c = 39 + p = m$. L'abaissement Δ observé est précisément l'abaissement moléculaire.

$$\Delta = \Delta_m = 15 + \text{abaissement mol. de l'ac. monobasique, } 20 = 35 \qquad (2)$$

Supposons au contraire que l'acide soit bibasique : alors, la molécule du sel aura pour formule (K^2A''). L'abaissement moléculaire sera $\Delta_m = 2 \times 15 + 11 = 41$. Le poids moléculaire du sel sera égal à $2K + 2p$, c'est-à-dire double de c. On aura $m = 2c$. L'abaissement moléculaire,

$$\Delta_m = \Delta \frac{m}{c} \text{ se réduit à } 2\Delta.$$

On a donc

$$2\Delta = 41$$

ou

$$\Delta = 20{,}5 \qquad (3)$$

Dans le premier cas, le nombre cryoscopique sera voisin de 35 ; dans le second cas, il sera voisin de 20.

Ainsi, suivant que l'acide sera monobasique ou bibasique, l'abaissement du point de congélation de la solution du sel alcalin (poids de sel qui contient un atome de métal dans 100 grammes d'eau) sera voisin de 35 ou de 20. Il n'y a qu'à voir si le nombre trouvé Δ s'approche de l'un ou de l'autre pour savoir si l'acide est monobasique ou bibasique. S'il était polybasique, Δ serait plus petit que 20.

157. *Application de la cryoscopie à la détermination de l'atomicité d'un métal.* — On procédera d'une manière analogue pour décider de l'atomicité d'un métal M. On considérera un sel de ce métal à acide monovalent, fort — un chlorure, un bromure ou un azotate. On en prendra le poids qui correspond à une molécule d'acide ; on le dissoudra dans 100 grammes d'eau, et l'on cryoscopera la solution ; soit Δ l'abaissement observé du point de congélation.

Si le métal est monoatomique ($M'Cl$), l'abaissement moléculaire, d'après la règle de Raoult, devra être égal à 35. Il devra, d'autre part, se confondre avec l'abaissement observé, puisque le poids du sel qui contient la molécule d'acide, soit ($M'Cl$), est alors le poids moléculaire et que la solution cryoscopée est donc celle qui contient le poids moléculaire du sel.

Si le métal est biatomique ($M''Cl^2$), l'abaissement moléculaire, d'après la règle de Raoult, devra être égal à $8 + 2 \times 20 = 48$. Mais alors, la solution employée ne contient pas la molécule du sel, mais seulement sa moitié. Le nombre Δ trouvé correspond à la moitié de l'abaissement moléculaire. On doit avoir

$$\Delta = 24.$$

Si donc la valeur réellement trouvée pour Δ est voisine de 35, le métal est monobasique, monovalent ; si elle se rapproche de 24, il est bivalent. — Si elle est inférieure, le métal est d'une valence plus élevée.

158. *Applications à la biologie. — Solutions équimoléculaires ou équiparticulaires, isosmotiques, isotoniques, isocryoscopiques.* — La plupart des applications qui sont faites à la biologie des données osmotiques, tonométriques et cryoscopiques dérivent de cette notion que *les solutions équiparticulaires sont par là même isosmotiques, isotonométriques et isocryoscopiques*, c'est-à-dire qu'*elles ont même point de congélation*, *même tension de vapeur*, *même pression osmotique*. En toute rigueur, cette identité n'est vraie que pour une température déterminée, par exemple celle de congélation. Aux autres températures, elle ne se maintient pas, parce que d'abord les diverses solutions subissent avec un résultat différent l'action de la température, et que, équimoléculaires à une température, elles peuvent ne pas l'être à une autre ; en second lieu, parce que, lorsque la température varie, la tension de vapeur ne suit pas, pour toute substance, les mêmes lois. L'équilibre d'osmose et de distillation ne se conserve pas tout à fait. Mais pratiquement, et avec une approximation suffisante, on peut admettre qu'il se soutienne et que les solutions équiparticulaires sont isosmotiques, isotoniques et isocryoscopiques *à toutes les températures où s'accomplissent les phénomènes vitaux*.

On remarquera qu'il est parlé ici de solutions *équiparticulaires* et non *équimoléculaires*. C'est qu'il s'agit, en réalité, non pas seulement des éléments qui sont les *molécules* au sens des chimistes, mais de tous les éléments particulaires, libres dans la solution, de quelque nature qu'ils soient : véritables molécules chimiques, ions provenant de la dissociation de celles-ci, molécules condensées, molécules combinées à des molécules du dissolvant. Ce sont toutes ces particules hétérogènes, libres dans la liqueur, qui exercent individuellement au même titre et avec une égale énergie l'action osmotique, cryoscopique, tonométrique. M. Raoult, pour en éviter l'énumération, les a appelées les *monades* de la solution.

Dans le cas typique, normal, ces éléments de la solution, ces monades, se réduisent aux molécules chimiques. Dans certains dissolvants, et pour certains corps dissous, il s'y ajoute des molécules condensées, plus rarement des molécules combinées. Dans les solutions aqueuses, et pour les électrolytes dissous, il y a, en plus, les ions.

159. *Autre application à la biologie. — Nombre de molécules d'une solution. — Simplification ou complication chimiques.* —

résulte de tout ce qui précède, que la grandeur de l'effet osmotique, tonométrique ou cryoscopique, fournit des renseignements sur le nombre des éléments libres dans la solution. Par exemple, une particule organique dans 100 grammes d'eau produit un abaissement moléculaire (on devrait dire *particulaire*) égal à 18,5; l'abaissement total produit par toutes les particules libres, si n est leur nombre, sera $n \times 18,5$ — et c'est celui Δ que fournit l'observation cryoscopique.

On a

$$\Delta = n \times 18,5$$

ou

$$n = \frac{\Delta}{18,5}.$$

Cette formule donne le *nombre relatif* de particules dissoutes dans 100 grammes d'eau. Si, par suite de réactions intestines se produisant plus ou moins lentement dans la liqueur, ce nombre vient à augmenter ou à diminuer, on en sera donc prévenu par l'observation du point de congélation. On constatera que l'abaissement augmente ou diminue.

Une série de déterminations cryoscopiques, successivement opérées sur une liqueur déterminée, peut donc renseigner sur les phénomènes d'analyse ou de synthèse qui s'y accomplissent — en prenant ces mots, synthèse, analyse, dans leur sens le plus étendu, c'est-à-dire dans le sens de diminution du nombre des monades qui se groupent et se combinent, ou, au contraire, d'augmentation du nombre de ces monades dont certaines ont dû subir une décomposition. Il est possible de constater, par là, si la liqueur tend vers la simplification ou la dislocation moléculaire ou vers la complication — et dans quelle mesure. Rien, *à priori*, ne semble plus utile à la biologie qu'une notion de ce genre, puisqu'il est admis comme règle que le fonctionnement vital, chez les animaux et chez les plantes (sauf pour la fonction chlorophyllienne), a pour conséquence la dislocation des composés chimiques, aliments ou réserves, qui fournissent, par transformation énergétique, l'énergie vitale.

Applications. — 1° Quel est le nombre d'éléments existant dans un litre de sérum sanguin dont le point de congélation est $-0°,55$? La formule $n = \frac{\Delta}{18,5}$ donne le nombre d'éléments dans 100 grammes d'eau. Dans 1 000 grammes d'eau, ce sera $\frac{\Delta}{1,85}$. Si, par approximation, on confond la solution avec le solvant, ce sera le nombre de particules dans le litre de solution.

Ici, $\frac{0,55}{1,85} = 0,292$. Ce nombre 0,292 représentera le nombre relatif de particules dissoutes dans le litre de sérum.

2° Le point de congélation de la solution s'est abaissé de 1 degré. De combien a augmenté le nombre de molécules de la solution?

L'abaissement primitif était Δ; le nombre d'éléments $n = \frac{\Delta}{1,85}$ par litre. L'abaissement nouveau est $\Delta + 1$,... le nombre correspondant $n' = \frac{\Delta + 1}{1,85}$. La différence qui exprime l'augmentation est $n' - n = \frac{1}{1,85}$.

Si le point de congélation s'est abaissé de d degrés, le nombre d'éléments dissous a augmenté de $\frac{d}{1,85}$ par litre.

3° Déduire la composition d'une solution de l'abaissement Δ de son point de congélation. On suppose, bien entendu, qu'il n'y ait qu'un corps en solution et que l'on connaisse son poids moléculaire m.

La formule $\Delta_m = \Delta \frac{m}{c}$ permet d'obtenir la concentration c (c grammes pour 100 grammes d'eau) de la solution si l'on connaît en même temps l'abaissement moléculaire Δ_m. Mais celui-ci est, en général, variable avec la concentration, et il faudrait le connaître pour la concentration cherchée : on serait dans un cercle vicieux. En toute rigueur, et dans le cas général, le problème est donc illusoire. Mais, dans certains cas particuliers, lorsqu'il s'agit, par exemple, de solutions aqueuses d'alcool ou d'acide acétique, l'abaissement moléculaire est sensiblement constant entre des limites très étendues, et a sa valeur normale 18,5. On tire alors la concentration c de la formule précédente, avec une suffisante exactitude :

$$c = \frac{\Delta_m}{\Delta} . m.$$

Il y a toutefois deux suppositions qui sont impliquées dans le raisonnement précédent. La première, c'est que le renseignement cryoscopique (osmotique ou tonométrique) s'applique à des molécules chimiques. Or, il s'applique, en réalité, aux particules physiques libres du corps en solution. Or, celles-ci ne se confondent point nécessairement avec les véritables molécules chimiques ; mais, au contraire, cette confusion est l'exception : elle se produit seulement dans des cas plus ou moins déterminés ; par exemple, lorsqu'il s'agit des solutions des substances organiques dans l'eau. La seconde, c'est qu'au point de vue cryoscopique, les choses se passent pour un mélange de plusieurs corps comme pour un corps unique. On remarquera, en effet, que dans tout ce qui précède il n'a jamais été question que de solutions renfermant une substance unique. Il faut donc s'assurer si les lois indiquées s'appliquent à un mélange. Nous allons voir qu'elles s'y appliquent, en effet, approximativement.

160. Mélange de divers corps en solution. — Loi des mélanges. — L'abaissement du point de congélation est proportionnel au nombre de particules actives, libres, contenues dans la solution, lorsqu'il s'agit d'une substance unique. La loi est-elle la même lorsqu'il y a plusieurs substances dissoutes ? L'abaissement est-il proportionnel au nombre total des particules libres ? La théorie le veut ainsi, puisque chaque molécule dissoute exerce la même action.

Mais il est bien évident que cette loi ne peut s'appliquer au mélange des corps qu'autant qu'elle s'applique d'abord à chacun d'eux. Il faut que chacun isolément obéisse à la loi des concentrations, c'est-à-dire qu'il faut que sa dilution ne produise pas de dissociations moléculaires ou de condensations ; ou, s'il s'en produit, qu'il en soit tenu compte dans l'évaluation du nombre des particules.

Soient deux corps A_1 et A_2. On dissout c_1 grammes du premier dans 100 grammes d'eau et l'on a l'abaissement cryoscopique Δ_1 correspondant à n_1 particules. De même c_2 grammes de A_2 dans 100 grammes du même dissolvant donnent l'abaissement cryoscopique Δ_2 correspondant à n_2 particules. — Supposons maintenant qu'on dissolve dans 100 grammes à la fois, c_1 grammes du premier et c_2 du second. L'abaissement sera $\Delta_1 + \Delta_2$. Mais ceci à la condition que l'introduction de l'un des corps ne change rien à la condition physique ou chimique de l'autre, c'est-à-dire que les choses se

passent exactement de la même manière que si les corps étaient parfaitement indifférents l'un à l'autre, à la fois physiquement et chimiquement, et que le nombre total des particules dissoutes soit $n_1 + n_2$. Or, on n'est jamais sûr *à priori* qu'il en soit ainsi; on n'est jamais sûr qu'il n'y ait ni dissociation ni condensation. On ne sait pas ce qui se passe au point de vue physique dans le mélange de deux corps avec le dissolvant, puisque, dans la plupart des cas, on le sait à peine pour un seul corps dont la concentration change.

On se contente d'énoncer la condition que les deux corps ne doivent pas exercer d'*action chimique* l'un sur l'autre. Mais il faut ici prendre l'expression d'*action chimique* dans un sens infiniment plus étendu qu'on ne le fait, c'est-à-dire l'entendre de toute action capable de modifier le nombre des éléments physiques libres dans la liqueur.

A cette condition, on pourra admettre la loi des mélanges. $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta$, etc.

Elle s'exprime ainsi :

Lorsque plusieurs corps qui n'ont pas d'action chimique les uns sur les autres sont dissous dans un même liquide, l'abaissement du point de congélation est égal à la somme des abaissements que chacun des corps produirait isolément s'il existait seul avec sa concentration propre.

On remarquera que cette loi est la loi même du mélange des vapeurs, transportée des pressions de vapeur aux abaissements de congélation.

On se rendra compte de l'exactitude de cette règle par l'exemple suivant (1)

Exemple : On dissout dans 100 grammes d'eau, 4gr,464 d'azotate de potasse — et 3gr,286 de chlorure de sodium. On prend le point de congélation; on le trouve égal à — 3°,564. L'abaissement est 3°,564.

D'autre part, la solution de 4gr,464 de AzO^3Na dans 100 grammes d'eau a pour température de congélation — 1°,607 ; l'abaissement est 1°,607. La solution de 3gr,286 de NaCl dans 100 grammes d'eau a pour température de congélation — 1°,919; l'abaissement est 1°,919. La somme des deux abaissements est 3°,526, qui ne diffère de l'abaissement trouvé pour le mélange, 3°,564, que de 0°,038.

Nota bene. — Au lieu de mesurer ces abaissements isolés correspondant aux concentrations 4gr,464 de AzO^3Na et 3,286 de NaCl, on peut les déduire de l'examen des tables relatives à ces sels, ou des courbes d'abaissement moléculaire, par la loi de Blagden.

Les applications chimiques de la loi des mélanges sont très nombreuses. M. Raoult s'en est servi pour étudier certains équilibres chimiques, et spécialement le partage des acides et des bases, l'action de l'eau sur les sels doubles, les phénomènes internes de la dissolution de l'acide tartrique racémique, qui disparaît dans l'eau en tant qu'acide racémique, etc. On peut se borner, pour le moment, à indiquer le principe des applications physiologiques.

161. *Application biologique de la loi des mélanges. — Détermination du point de congélation d'une substance dissoute et de sa concentration, par différence. — Poids moléculaire moyen.* — Si, dans un mélange de deux éléments, on connaît un des éléments ainsi que ses données cryoscopiques, on pourra déduire de la mesure cryoscopique du mélange le point de congélation du second et de là sa concentration (**159**,3°).

C'est ce qui a été fait par plusieurs physiologistes.

Par exemple, on a quelquefois intérêt, en physiologie, à connaître la

(1) Chanoz, *loc. cit.*, p. 64 et 65.

teneur d'un liquide de l'économie, par exemple le sérum du sang, en substances organiques.

Or, les liquides de l'économie sont des solutions aqueuses contenant deux espèces de substances dissoutes : des substances minérales et des matériaux organiques. On peut se former une idée de l'abondance de ceux-ci en exécutant deux opérations cryoscopiques.

D'abord, on pratique la cryoscopie du liquide tout entier. On a un abaissement Δ total, somme des abaissements partiels dus aux matières minérales existant présentement dans la solution Δ_1, et aux substances organiques Δ_2... $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$.

Ceci fait, on se procure les substances minérales. Pour cela, on évapore un certain volume V du liquide ; on incinère; on a les cendres. On les dissout dans le volume d'eau V. On cryoscope cette solution. On a l'abaissement de congélation, Δ'. On convient de prendre Δ' pour Δ_1 ; c'est-à-dire de confondre cet abaissement Δ', dû à la solution des matières incinérées, avec l'abaissement Δ_1, qui serait dû aux matières minérales originellement contenues dans la liqueur, et certainement différentes des matières incinérées. Cette confusion est tout à fait illégitime et l'on ne peut, *à priori*, se rendre aucun compte de l'erreur ainsi commise.

Acceptant cette convention, on a alors, d'après la loi des mélanges — et avec les restrictions qu'elle comporte elle-même :

$$\Delta_2 = \Delta - \Delta_1.$$

Exemple : le sérum total fournit un point de congélation $\Delta = 0°,595$.
Les matières minérales incinérées donnent un point de congélation $\Delta = 0,480$.
La part des substances organiques sera $\Delta_2 = 0°,115$. Le nombre des molécules de la matière organique sera $n = \frac{0,115}{18,5}$ dans 100 grammes d'eau, soit 0,062 dans un litre.

Poids moléculaire moyen. — Quelques expérimentateurs, à la suite de MM. Bouchard et Winter, ont introduit une autre notion, celle du poids moléculaire moyen.

Avec une seule substance en solution, on a $\Delta = \Delta \frac{m}{c}$... s'il s'agit d'une substance organique suivant parfaitement la loi de Blagden;
ou

$$m = \frac{\Delta_m}{\Delta} \times c \qquad (1)$$

formule qui donne le poids moléculaire. Δ_m est égal à 18,5 dans le cas des solutions aqueuses.

Supposons maintenant un mélange renfermant différents corps C_1, C_2, C_3... dont on connaît le poids total $C = C_1 + C_2 + C_3$,... etc., et dont on détermine l'abaissement de congélation Δ.

Si dans la formule (1) nous remplaçons C par la somme des poids des matières dissoutes, Δ_m par 18,5, Δ par sa valeur, on aura pour m une certaine valeur.

C'est cette valeur que l'on a appelée « le poids moléculaire moyen des substances dissoutes ».

Cette expression n'a pas de signification physique. Elle ne représente pas, en particulier, la moyenne des poids moléculaires des substances dissoutes. On a pu cependant s'en servir, empiriquement, pour interpréter les résultats de certaines expériences intéressantes.

§ III. — RELATIONS ENTRE LES MESURES CRYOSCOPIQUES, TONOMÉTRIQUES ET OSMOTIQUES

SOMMAIRE. — **162.** Principe des relations entre les mesures cryoscopiques, tonométriques et osmotiques pour une même solution. — **163.** Relation entre l'abaissement du point de congélation et la dépression de vapeur. — **164.** Relation entre l'abaissement cryoscopique et la pression osmotique. — **165.** Relation entre l'abaissement cryoscopique et l'élévation du point d'ébullition. — **166.** Relation entre l'abaissement de congélation et les constantes thermiques. — **167.** Relation entre la pression osmotique et l'élévation du point d'ébullition. — **168.** Relation entre la pression osmotique et la dépression tonométrique. — **169.** Conclusion.

162. Principe des relations entre les mesures cryoscopiques, tonométriques et osmotiques pour une même solution. — Les relations théoriques qui existent entre les constantes osmotiques, cryoscopiques, tonométriques et moléculaires d'une solution ne peuvent être mises en lumière d'une façon suffisamment élémentaire pour trouver place ici. On peut, tout au moins, essayer de se rendre compte du principe d'où se déduisent ces relations. Il a été déjà indiqué plusieurs fois (***92***, ***110***, ***124***). Il consiste en ce que, étant donnée une solution, la séparation du corps dissous d'avec le dissolvant peut être réalisée de diverses manières, dont on exprimera l'équivalence. Par exemple, on peut enlever le dissous au dissolvant par l'osmose à travers une membrane hémiperméable ; et on montre facilement que les variations de la pression osmotique permettent d'évaluer le travail nécessaire à la séparation d'une certaine quantité du dissolvant d'avec une quantité donnée du dissous (***92***).

Une autre manière de réaliser cette séparation, c'est de recourir à la congélation. La congélation d'une solution, comparée à la congélation du liquide pur, exige un travail supplémentaire préalable, destiné à séparer les molécules du corps dissous d'avec celles du corps dissolvant qui les retiennent.

On peut encore effectuer la même séparation au moyen de l'évaporation qui enlèvera le liquide à l'état de vapeur ; — ou, en introduisant dans la solution un autre corps solide qui soustraira au premier une partie de son solvant (Nernst) ; — ou, enfin, par l'électrolyse, qui amènera le dépôt du corps dissocié en ions aux électrodes. En évaluant ces travaux, dans chaque cas, au moyen des paramètres physiques correspondants, tension de vapeur, chaleur de fusion, chaleur de vaporisation, pression osmotique, température d'ébullition, température de congélation, — et en exprimant directement ou indirectement que, dans la condition d'équilibre, ces travaux sont égaux pour la même quantité du corps dissous, on aura une relation entre ces diverses grandeurs, pression osmotique, abaissement du point de congélation, dépression de vapeur, et généralement entre toutes autres constantes caractéristiques d'une solution. Mais, cette évaluation exige l'application des notions de la thermo-

dynamique. Il ne peut être question, ici, d'entrer dans cette voie. Il faut se contenter d'indiquer l'existence de ces démonstrations et de ces relations, en renvoyant aux mémoires spéciaux, pour le surplus.

163. Relation entre l'abaissement du point de congélation et la dépression de vapeur. — Il y a, entre l'abaissement Δ du point de congélation d'une solution et la dépression relative de vapeur $\frac{f-f'}{f}$, une relation théorique qui se déduit des lois de la thermodynamique (équation de Clausius-Clapeyron) (1). Elle s'exprime (**111**), pour les solutions aqueuses étendues, par la formule de Guldberg et Kolacek :

$$\Delta . \frac{f}{f-f'} = 105 \qquad \text{(XXIV)}$$

ou, dans le cas général, pour les solutions étendues, par la relation

$$\frac{f-f'}{f} . \frac{1}{\Delta} \times \frac{T^2}{L_1 \times M} 1{,}988 = \frac{d'}{d} \qquad \text{(XXVI)}$$

dans laquelle M est le poids moléculaire du dissolvant, L sa chaleur latente de fusion, d la densité théorique de la vapeur, d' la densité réelle à la température absolue T.

164. Relation entre l'abaissement cryoscopique et la pression osmotique. — La relation entre la pression osmotique π et l'abaissement cryoscopique Δ d'une solution est fournie par la formule

$$\pi^{\text{atm.}} = \frac{1000\,\text{S.L}}{24{,}25} . \frac{\Delta}{T_0} \qquad \text{(XXVII)}$$

L, chaleur latente de fusion pour 1 gramme de dissolvant (eau).
S, poids spécifique du dissolvant.
T_0, température (absolue) de fusion du dissolvant.

Exemple (2) : Soit la solution de $2^{\text{gr}},47$ de benzoate d'éthyle dans 100 grammes de benzol. Le point de congélation du benzol $5^{\circ},5$ se trouve abaissé à $4^{\circ},66$. — L'abaissement $\Delta = 0{,}84$. La chaleur de fusion du benzol est 30,08 calories ; son poids spécifique S à la température de fusion $5^{\circ},5$ est égal à 0,8875. Le calcul donne

$$\pi = \frac{1000 \times 0{,}8875 \times 30{,}08}{24{,}25} . \frac{0{,}84}{273+5{,}5} = 3^{\text{atm}},324.$$

— Dans le cas des solutions aqueuses, la formule se simplifie beaucoup. On a, en remplaçant S par 1, L par $79^{\text{cal}},6$, T° par 273° :

$$\pi^{\text{atm.}} = 12{,}03 . \Delta \qquad \text{(XXVIII)}$$

Cette formule est d'un usage très fréquent. Elle permet de se rendre compte de la sensibilité de la méthode cryoscopique. On voit que pour un abaissement cryoscopique de $\frac{1}{1000}$ de degré, la pression osmotique augmente

(1) F.-M. Raoult, *Tonométrie*, p. 27-30.
(2) W. Nernst, *Theoretische Chemie*, 2e édit., p. 143.

de plus de 12 millièmes d'atmosphère, c'est-à-dire de près d'un millimètre ($0^{mm},9$); quantité très appréciable.

Application. — Demandons-nous quelle est la pression osmotique d'une solution aqueuse de sucre de cannes à 1 p. 100.

Le point de congélation de cette solution a été trouvé égal à $-0^{o},0546$ (Raoult, Ponsot, Abegg). L'abaissement est donc 0,0546.

La formule (XXVIII) donne

$$\pi = 12{,}03 \times 0{,}0546 = 0{,}657 \text{ d'atmosphère} = 499^{mm},32 \text{ en hauteur de mercure.}$$

165. *Relation entre l'abaissement cryoscopique et l'élévation du point d'ébullition.* — La relation entre l'élévation du point d'ébullition Γ et l'abaissement du point de congélation Δ peut être obtenue en exprimant l'égalité des travaux nécessaires pour enlever l'eau à la solution, soit par congélation, soit par vaporisation.

On considère la solution à son point de congélation, et on imagine que l'on enlève à la solution 1 gramme d'eau à l'état de glace. Si Δ est l'abaissement du point de congélation et L la chaleur latente de fusion, le produit ΔL représentera la quantité de chaleur consommée par le travail de séparation; de même, si Γ est l'élévation du point de vaporisation dans les mêmes conditions, et L_2 la chaleur de vaporisation, le produit ΓL_2 représentera le même travail, et on aura :

$$\Gamma L_2 = \Delta L \qquad \text{(XXV)}$$

C'est-à-dire :

Pour les dissolutions étendues de même nature, et à la température de congélation, l'abaissement Δ du point de congélation et l'élévation Γ du point d'ébullition sont en raison inverse des chaleurs latentes L_1 et L_2 correspondant à ces deux changements d'état.

La relation précédente se déduit, en réalité, des équations de la thermodynamique (équation de Clausius-Clapeyron).

166. *Relation entre l'abaissement de congélation et les constantes thermiques.* — En se fondant sur des considérations de thermodynamique, Van t'Hoff a établi la formule suivante, valable pour les solutions très étendues :

$$\frac{\Delta}{c} m = 0{,}01988 \frac{T^2}{L} \qquad \text{(XXIX)}$$

c'est-à-dire :

$$\Delta_m = 0{,}02 \frac{T^2}{L}.$$

où L est la chaleur de fusion pour 1 kilogramme du dissolvant;

T la température de congélation du dissolvant;

c la concentration de la solution (c grammes du corps dissous dans 100 grammes du dissolvant;

m le poids moléculaire du corps dissous;

Δ l'abaissement de congélation de la solution.

Cette formule peut servir à déterminer l'abaissement moléculaire normal des dissolvants pour lesquels il n'y a pas eu de table exécutée. Heycock et

Neville s'en sont servis pour les dissolvants métalliques : étain, sodium, bismuth, cadmium, plomb, dans lesquels ils dissolvaient (fondaient) les autres métaux (**152**).

167. Relation entre la pression osmotique et l'élévation du point d'ébullition. — La relation entre la pression osmotique et l'élévation du point d'ébullition de la solution est donnée par la formule

$$\pi^{\text{atm.}} = \frac{1000\,\text{S.L}_2}{24{,}25} \cdot \frac{\Gamma}{\text{T}} \qquad \text{(XXX)}$$

formule encore applicable pour des élévations du point d'ébullition atteignant de 5° à 10°.

Dans cette formule :

π est la pression osmotique en atmosphères ;

Γ est l'élévation, par le fait de la matière dissoute, du point d'ébullition du dissolvant pur ;

T est le point d'ébullition du dissolvant pur (température absolue) ;

S est la densité du dissolvant ;

L_2 est la chaleur de vaporisation pour 1 gramme du dissolvant, exprimée en petites calories.

Dans le cas de l'eau, cette formule se réduit. On a, en effet :

S, densité de l'eau à 0° = 0,959. — L_2 chaleur latente de vaporisation de 1 gramme d'eau = 0,5364 en petites calories. — T, température d'ébullition de l'eau pure, = 273 + 100°.

D'où, en effectuant :

$$\pi = \frac{0{,}959 \times 1000 \times 0{,}5364}{24{,}25} \cdot \frac{\Gamma}{273 + 100}$$

ou

$$\pi^{\text{atm.}} = 56{,}8 \times \Gamma. \qquad \text{(XXXI)}$$

Formule qui donne immédiatement, en atmosphères, la pression osmotique d'une solution aqueuse dont le point d'ébullition est 100° + Γ.

168. Relation entre la pression osmotique π et la dépression tonométrique $\frac{f-f'}{f}$. — La relation entre la pression osmotique π et la dépression tonométrique $\frac{f-f'}{f}$ d'une solution déterminée s'exprime par une formule approchée, qui convient aux cas des solutions très étendues et que nous allons démontrer. Elle s'exprime aussi rigoureusement par une formule plus générale.

— La relation générale se déduit de considérations empruntées à la thermodynamique. La voici :

$$\pi^{\text{atm.}} = \frac{82{,}1.\ \text{S.T}}{\text{M}} \log.\ \text{nép.} \frac{f'}{f} \qquad \text{(XXXII)}$$

dans laquelle, π représente la pression osmotique de la solution, évaluée en atmosphères. — M, le poids moléculaire du dissolvant en grammes. — S, le poids spécifique de la solution (poids du centimètre cube, en grammes). — f est la tension de vapeur du dissolvant pur ; et f' la tension de vapeur de la solution à la température T, ces tensions se déduisant de la mesure des points d'ébullition (**98**) et s'évaluant en atmosphères et fractions d'atmosphère. — T est la température absolue, correspondant aux tensions f et f'.

La formule approchée est

$$\pi = \frac{f - f'}{f} \cdot \frac{82{,}1.S.T}{M} \qquad \text{(XXXIII)}$$

Cette relation peut servir à calculer la *pression osmotique* en fonction des mesures tonométriques.

Application. — En voici un exemple emprunté à Nernst :

Soit la solution de benzoate d'éthyle contenant $2^{gr},47$ dans 100 grammes de benzol. A la température de 80° (T = 80° + 273°), la tension de vapeur du benzoate d'éthyle est $f' = 742^{mm},60$ de mercure ; celle du benzol est $751{,}86 = f$. De là, $f - f' = 9^{mm},26$ et $\frac{f - f'}{f} = \frac{9{,}26}{742{,}60}$.

La densité de la solution à 80° est 0,8149. Le poids moléculaire du benzol est M = 78.

La pression osmotique est

$$\pi = \frac{9{,}21}{742{,}60} \; \frac{0{,}0821(273 + 80).8149}{78} = 3{,}78 \text{ atmosphères.}$$

L'usage fréquent que l'on fait de cette relation nous engage à entrer dans quelques détails sur la manière dont on peut l'établir.

Démonstration. — Cette relation approchée entre la pression osmotique et la dépression tonométrique peut se déduire de la considération de l'équilibre, tel qu'il est réalisé dans l'osmomètre sous cloche (**95**).

On a vu que pour l'équilibre il fallait que la tension de vapeur f fût plus grande pour l'eau pure que pour la solution.

En D est la membrane hémiperméable, en S la solution, en E l'eau pure, en H le niveau de la solution ; le tout est à la même température. Si la pression p' ou f' de la vapeur d'eau dégagée de la solution était plus grande que la tension de la vapeur p ou f émanée de l'eau pure, à la température commune, cette vapeur se liquéfierait en vertu de son excès de pression. L'eau passerait ainsi du tube osmométrique dans le vase extérieur. Elle passerait ensuite du vase E à travers la membrane hémiperméable dans le vase S, pour venir rétablir la hauteur osmotique H.

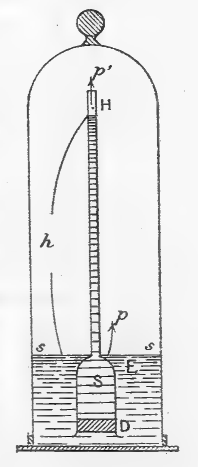


Fig. 455.

On se représentera convenablement les circonstances du phénomène en supposant qu'il n'y ait d'abord que de l'eau pure dans l'osmomètre comme dans le vase extérieur. Les niveaux coïncideront : l'atmosphère de la cloche sera saturée de vapeur à la pression f. Si, par une cause quelconque, la

tension de vapeur devenait supérieure à f, il y aurait liquéfaction à la surface, en E.

Imaginons maintenant qu'on ajoute en S, dans l'osmomètre, la substance dissoute. Aussitôt, de par le jeu de l'osmose, la solution montera jusqu'en H. Si la tension de vapeur émise par cette solution f' était supérieure à f, il y aurait alors évaporation supplémentaire en H; la tension de vapeur aqueuse augmenterait sous la cloche : il y aurait liquéfaction à la surface E. Cette eau de liquéfaction aurait fait un circulus complet. — En vertu de l'osmose, ce premier circulus recommencerait, car la hauteur osmotique doit se rétablir à sa valeur primitive; la hauteur ayant diminué par l'évaporation en H et l'addition en E, elle se rétablira par le passage d'une égale quantité d'eau pure à travers la cloison hémiperméable. Ce serait le mouvement perpétuel.

On sait cependant qu'il y a équilibre. Il faut donc que la tension de la solution f' soit plus petite que la tension de l'eau pure f.

Voyons de combien.

Quand l'équilibre sera établi dans la cloche, la vapeur d'eau immobile sera disposée en couches de densités et de tensions décroissantes, depuis la surface E, où la tension est f, jusqu'au niveau H, où elle est f'. D'après les lois de l'hydrostatique, la pression f à la surface de l'eau pure E est égale à la pression en H, f', augmentée du poids de cette colonne de vapeur, complexe, de hauteur h. Il en est ici comme dans l'atmosphère : la pression de l'air en un lieu est égale à celle d'un autre lieu plus élevé, augmentée du poids de la colonne complexe, de couches d'air à densités décroissantes, qui les sépare. On exprimera donc qu'il y a équilibre en écrivant que la différence $f - f'$ est égale au poids de la colonne de vapeur de hauteur h.

Toute la question est d'évaluer exactement le poids de cette colonne, c'est-à-dire la pression qu'elle exerce sur l'unité de surface, sur le centimètre carré. Ce serait facile si sa densité était uniforme : on multiplierait la hauteur h évaluée en centimètres (c'est-à-dire le volume en centimètres cubes) par le poids invariable du centimètre cube. — Mais le poids du centimètre cube varie suivant la hauteur, parce que varient la pression et la densité de la vapeur — et cette variation se fait d'une tranche à l'autre suivant une loi compliquée (1).

Supposons, pour un moment, — ce qui est une grossière approximation, — que la densité ne varie pas : qu'elle reste ce qu'elle est à la surface de l'eau pure. — Alors, il devient facile de connaître le poids de la colonne de vapeur, c'est-à-dire la pression cherchée, et de l'exprimer en atmosphères (2), en fonction de la pression osmotique π de la solution de poids spécifique S

(1) On pourrait essayer de tenir compte de cette variation. C'est en somme le problème du *nivellement barométrique*; il se présente en physique et en géodésie à propos de l'évaluation du poids de la colonne d'atmosphère de hauteur h comprise entre deux stations où la pression barométrique est f et f' (formules de Laplace, de Ramond, de Babinet). Si on assimile la colonne de vapeur d'eau, dont il est ici question, à un gaz parfait, on pourrait lui appliquer ces formules. C'est ce qu'a fait M. Houllevigne (Voy. Chanoz, *Considérations sur la pression osmotique*, p. 131).

(2) *Calcul*. — Demandons-nous quel est à la surface de l'eau pure, en E, le poids du cen-

(poids du centimètre cube), du poids moléculaire du dissolvant M, et enfin de la température absolue T. On aura pour sa valeur l'expression $\frac{M.f\pi}{S.82,1.T}$. En l'égalant à $f - f'$, il viendra :

$$\frac{f-f'}{f} \times \frac{1}{\pi} = \frac{M}{82,1.S.T} \qquad \text{(XXXIII)}$$

ce sera la relation cherchée.

timètre cube de vapeur. Nous supposons qu'elle se comporte comme un gaz parfait ; elle a en ce point la pression élastique f et la température absolue T.

Or, le poids du centimètre cube d'un gaz, ou d'une vapeur prise à la température T et à la pression f, est facile à connaître si l'on a son poids moléculaire M. Considérons, en effet, une masse de ce gaz ou vapeur pesant le poids moléculaire M. Soit v son volume dans les conditions précitées, volume en litres. M grammes étant le poids de v litres, $\frac{M}{v}$ sera le poids d'un litre, $\frac{M}{v.1000}$ sera le poids, en grammes, de 1 centimètre cube. — Nous ne connaissons pas v, mais il est facile à déterminer au moyen des quantités connues, telles que f et T. En effet, la formule des gaz et vapeurs qui résume les lois de Mariotte et Gay-Lussac, établit entre les trois grandeurs f, v, T, pression, volume, température absolue, de la même masse de gaz ou vapeur M, la relation suivante (76) :

$\frac{f.v}{T} = 84500$, f étant évalué en grammes et v en centimètres cubes, ou $\frac{f.v}{T} = 0,0821$, si le volume v est évalué en litres, et la pression f en atmosphères. ($1033^{gr},6 = 1$ atmosphère, pression sur 1 centimètre carré de surface).

On a donc $v = \frac{0,0821}{f}T$. Remplaçant v par cette valeur, le poids du centimètre cube de vapeur, en grammes, $\frac{M}{1000.v}$ deviendra $\frac{M}{1000 \times \frac{0,0821.T}{f}}$ ou $\frac{Mf}{1000 \times 0,0821.T}$. Le poids de la colonne de vapeur, de hauteur h centimètres (pression exercée sur le centimètre carré de surface) sera

$$h \times \frac{Mf}{1000 \times 0,0821.T} \text{ en grammes.}$$

Pour l'avoir en atmosphères, il faudra diviser par $1033^{gr},6 = 76^{cm} \times 13,6$, pression d'une atmosphère (pression exercée sur le centimètre carré de surface par la colonne de mercure de 76 centimètres de hauteur).

On a, en résumé,

$$h.\frac{M.f}{1000 \times 0,0821\,T,\,1033.6}\text{atm.} \qquad (1)$$

pour la pression de la colonne de vapeur, dans l'osmomètre sous cloche.

— La colonne de vapeur a précisément la hauteur h de la colonne osmotique : c'est par là que le phénomène tonométrique est relié au phénomène osmotique, dans l'appareil. Dans cet osmomètre sous cloche, la pression osmotique est égale au poids de la colonne de solution de hauteur h centimètres. Soit S le poids spécifique de cette solution (poids du centimètre cube) : la pression osmotique en grammes sera hs sur l'unité de surface (centimètre carré). En atmosphères, elle sera : $\pi^{atm.} = \frac{h.s}{1033,6}$ (2)

La pression de la colonne de vapeur sera donc exprimée en fonction de la pression osmotique π, si l'on remplace h par sa valeur $\frac{\pi \times 1033,6}{S}$; elle sera :

$$\frac{M.f\pi.1033.6}{S.1000 \times 0,0821.\,1033,6.T} = \frac{M.f.\pi}{S.\,82,1.\,T}.$$

Tout cela n'est que préparatifs de calcul. Et, maintenant que cela est fait, il faut en venir au

169. Conclusion. — On a fait ressortir à plusieurs reprises, au cours de cette étude sur l'osmose, la tonométrie et la cryoscopie, le parallélisme parfait de ces trois propriétés des solutions : l'abaissement du point de congélation, la dépression de la vapeur, ou, ce qui revient au même, l'élévation du point d'ébullition ; enfin, le phénomène d'osmose. Au point de vue expérimental, on a trouvé, dans les trois cas, les mêmes lois générales, les mêmes exceptions à ces lois présentées par les mêmes solutions d'électrolytes, le moyen d'écarter les exceptions au moyen des mêmes interprétations ; enfin la coïncidence jusque dans les mesures, qui s'accordent les unes avec les autres (***149***).

Cette coïncidence a été expliquée par des raisons théoriques de deux ordres différents :

La première interprétation rattache les trois espèces de propriétés des solutions à la fonction moléculaire, et les fait dépendre uniquement du nombre des molécules des corps dissous et dissolvant, comme la théorie d'Avogadro fait dépendre la propriété des gaz du nombre et du volume moléculaires. Ce sont, de même, des propriétés *additives* ou *colligatives*, indépendantes de la nature des corps où elles se manifestent et sans sujétion à aucun des paramètres physiques, qui règlent la grandeur des autres phénomènes, tels que poids spécifique, chaleur spécifique, etc., mais liées seulement au nombre des particules physiques que le corps présente dans un espace donné. On a vu (***150***) les réserves faites par quelques physiciens relativement à ces idées.

Le second ordre de raisons théoriques qui explique la concordance des propriétés des solutions, poussée jusqu'à l'accord des mesures, est tiré de la thermodynamique — ou, plus exactement, du principe qu'il faut dépenser un travail égal pour séparer par l'osmose, par l'évaporation ou par la solidification, dans des circonstances identiques, la même quantité du dissous de la même quantité du dissolvant : l'évaluation de ces travaux étant fournie par la thermodynamique. C'est ce que l'on vient de voir dans ce chapitre. La théorie fournit ici des relations précises et numériques entre les trois catégories de grandeurs.

Il resterait à passer en revue les applications biologiques de ces études physiques. Mais elles trouveront mieux leur place après un dernier chapitre (celui de l'électrolyse) qui intéresse toute une catégorie de solutions, et précisément celles qui interviennent le plus communément dans les expériences physiologiques.

point essentiel, c'est-à-dire exprimer la condition d'équilibre : c'est à savoir que la pression de la colonne de vapeur fait équilibre, dans l'osmomètre sous cloche, à la différence des pressions en E et en H :

$$f - f' = \frac{M.f.\pi}{S.\ 82{,}1.T}$$

et enfin

$$\frac{f-f'}{f} \times \frac{1}{\pi} = \frac{M}{S.82{,}1.T} \qquad \text{(XXXIII)}$$

PROPRIÉTÉS DES GAZ

Par M. J. TISSOT.

ÉQUILIBRE DES GAZ. — 1° *Pesanteur de l'air.* Baromètre. — 2° *Extension du principe d'Archimède aux gaz.* Influence de l'air sur les pesées.
ÉLASTICITÉ DES GAZ. — *Loi de Mariotte.* Manomètre. Voluménomètre. — *Loi du mélange des gaz.* — *Absorption des gaz.* — Solubilité des gaz. — Loi d'Henry. — Loi de Dalton. — *Condensation des gaz par les solides.* Occlusion.
DIFFUSION DES GAZ. — DISSOCIATION.

Pesanteur de l'air. — La pesanteur de l'air étant démontrée par les expériences de Toricelli et de Pascal, le principe de Pascal s'applique aussi bien aux gaz qu'aux liquides. L'expérience de Toricelli nous permet de connaître facilement la pression exercée par l'air sur une surface donnée à un instant déterminé ; d'où le nom *baromètre* donné au tube de Toricelli. Le poids de la colonne de mercure soulevée dans le tube fait équilibre à la pression exercée par l'atmosphère sur une surface égale à la surface de la base de la colonne de mercure.

La pression exercée sur une surface quelconque par l'atmosphère est égale au poids d'une colonne de mercure ayant pour base la surface en question et pour hauteur la hauteur de la colonne mercurielle dans le baromètre au moment considéré.

Baromètre. — Je ne m'occuperai ici que du baromètre Fortin, qui est à peu près le seul employé dans les laboratoires et dont la précision suffit largement dans toutes les recherches biologiques. Je suppose cet instrument parfaitement connu et je n'indiquerai ici que les corrections qu'il est nécessaire d'effectuer pour ramener la hauteur barométrique lue à ce qu'elle serait si le mercure du baromètre et l'échelle étaient à 0°.

La correction se fait à l'aide de la formule :

$$h_0 = (\alpha - \beta)\, ht$$

h_0 étant la hauteur véritable à 0° de la colonne de mercure, h la hauteur ou pression lue, t la température du baromètre, β le coefficient de dilatation de l'échelle et α celui du mercure.

La valeur des deux coefficients de dilatation étant :

$$\alpha = 0{,}000181 \qquad \beta = 0{,}000019$$

pour une échelle en laiton, c'est-à-dire α étant à peu près dix fois plus grand que β, la correction de dilatation du mercure est beaucoup plus importante que la correction de dilatation de l'échelle.

h_0 est la quantité qu'il faut retrancher de la pression lue pour avoir la pression véritable à 0°.

La correction se fait facilement à l'aide de la table suivante, qui donne la valeur de $(\alpha-\beta)\,ht$ pour des pressions variant de 10 en 10 millimètres et des températures variant de degré en degré.

Réduction du baromètre à 0.

Correction en millimètres, $l(\alpha-k)\,t$, à retrancher de la hauteur observée sur une échelle en laiton.

Température *t*.	HAUTEUR OBSERVÉE EN MILLIMÈTRES.											$0{,}007\,t$ Quantité dont il faudrait augmenter la correction si l'échelle était en verre.
	680	690	700	710	720	730	740	750	760	770	780	
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	
1°	0,11	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,01
2	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,25	0,25	0,25	0,02
3	0,33	0,34	0,34	0,35	0,35	0,35	0,36	0,36	0,37	0,37	0,38	0,02
4	0,44	0,45	0,45	0,46	0,47	0,47	0,48	0,49	0,49	0,50	0,50	0,03
5	0,55	0,56	0,57	0,58	0,58	0,59	0,60	0,61	0,62	0,62	0,63	0,04
6	0,66	0,67	0,68	0,69	0,70	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,76	0,04
7	0,77	0,78	0,79	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,05
8	0,88	0,89	0,90	0,92	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1,01	0,06
9	0,99	1,01	1,02	1,04	1,05	1,06	1,08	1,09	1,11	1,12	1,13	0,06
10	1,10	1,12	1,13	1,15	1,17	1,18	1,20	1,22	1,23	1,25	1,26	0,07
11	1,21	1,23	1,25	1,27	1,28	1,30	1,32	1,34	1,35	1,37	1,39	0,08
12	1,32	1,34	1,36	1,38	1,40	1,42	1,44	1,46	1,48	1,50	1,52	0,08
13	1,43	1,45	1,47	1,50	1,52	1,54	1,56	1,58	1,60	1,62	1,64	0,09
14	1,54	1,56	1,59	1,61	1,63	1,66	1,68	1,70	1,72	1,75	1,77	0,10
15	1,65	1,68	1,70	1,73	1,75	1,77	1,80	1,82	1,85	1,87	1,89	0,11
16	1,76	1,79	1,81	1,84	1,87	1,89	1,92	1,94	1,97	2,00	2,02	0,11
17	1,87	1,90	1,93	1,96	1,98	2,01	2,04	2,07	2,09	2,12	2,15	0,12
18	1,98	2,01	2,04	2,07	2,10	2,13	2,16	2,19	2,22	2,25	2,28	0,13
19	2,09	2,12	2,15	2,19	2,22	2,25	2,28	2,31	2,34	2,37	2,40	0,13
20	2,20	2,24	2,27	2,30	2,33	2,37	2,40	2,43	2,46	2,49	2,52	0,14
21	2,31	2,35	2,38	2,42	2,45	2,48	2,52	2,55	2,59	2,62	2,65	0,15
22	2,42	2,46	2,49	2,53	2,57	2,60	2,64	2,67	2,71	2,74	2,77	0,16
23	2,53	2,57	2,61	2,65	2,68	2,72	2,76	2,79	2,83	2,87	2,90	0,16
24	2,64	2,68	2,72	2,76	2,80	2,84	2,88	2,92	2,95	2,99	3,03	0,17
25	2,75	2,79	2,84	2,88	2,92	2,96	3,00	3,04	3,08	3,12	3,16	0,18
26	2,86	2,91	2,95	2,99	3,03	3,07	3,12	3,16	3,20	3,24	3,28	0,18
27	2,97	3,02	3,06	3,11	3,15	3,19	3,24	3,28	3,32	3,37	3,41	0,19
28	3,08	3,13	3,18	3,22	3,27	3,31	3,36	3,40	3,45	3,49	3,54	0,20
29	3,19	3,24	3,29	3,34	3,38	3,43	3,48	3,52	3,57	3,62	3,66	0,20
30	3,30	3,35	3,40	3,45	3,50	3,55	3,60	3,65	3,69	3,74	3,78	0,21

Soit à corriger la pression 766mm,8, la température du baromètre étant 15°,4.

La correction sera faite comme si la pression lue était en réalité de 770 millimètres (1).

Pour 770 millimètres à 16°, la correction serait de...........	$2^{mm},00$
Pour 770 — à 15°, — —	$1^{mm},87$
Différence...........	$0^{mm},13$

Pour 770 millimètres à 15°,4, la correction à effectuer sera de $1,87 + (0,13 \times 0,4) = 1,87 + 0,05 = 1^{mm},92$. On retranchera donc de la pression lue $1^{mm},9$, la pression réelle à 0° sera :

$$766,8 - 1,9 = 764,9$$

Cette correction est loin d'être négligeable. Pour une température de 25° et aux pressions ordinaires, elle dépasse 3 millimètres de mercure. Dans la mesure des volumes gazeux, dans les analyses de gaz, une différence ou une erreur de 3 millimètres dans la mesure de la pression peut aboutir à une erreur assez considérable dans l'évaluation du volume gazeux. Ainsi une erreur de 2 millimètres dans la mesure de la pression donne lieu à une erreur de $0^{cc},26$ dans la mesure d'un volume de gaz de 100 centimètres cubes.

Je ne parle pas ici de la correction de capillarité qui doit être faite une fois pour toutes ; elle dépend du calibre du tube barométrique ; si l'on connaît le calibre de ce tube et la longueur de la flèche du ménisque, on trouve facilement la valeur de la correction en se reportant aux tables dressées à cet effet. On peut aussi, ce qui vaut mieux encore, comparer le baromètre à un baromètre normal.

Extension du principe d'Archimède aux gaz. — Le principe d'Archimède s'applique aussi bien aux gaz qu'aux liquides. L'expérience du *baroscope* le démontre et prouve aussi qu'il faut faire subir une correction à toutes les pesées effectuées dans l'air.

Influence de l'air sur les pesées. — Le corps à peser et les poids marqués éprouvent une perte de poids correspondant au poids du volume d'air qu'ils déplacent. Les volumes des poids et des corps à peser étant souvent très différents, la différence de poids des volumes d'air déplacés par chacun d'eux peut constituer une erreur plus considérable que l'erreur de pesée. Cette correction a une valeur telle qu'on doit en tenir compte dans beaucoup de cas.

ÉLASTICITÉ DES GAZ

Loi de Mariotte. — *Les volumes occupés par une même masse gazeuse, à température constante, sont inversement proportionnels aux pressions que le gaz supporte.*

(1) Les tables ne donnant la valeur des corrections que pour des pressions variant de 10 en 10 millimètres, on fait la correction d'après le nombre de la table qui se rapproche le plus de la pression lue ; dans l'exemple choisi, c'est 770 millimètres. Si la pression lue était 764 millimètres, par exemple, on ferait la correction sur le nombre 760. L'erreur résultant de la fraction de centimètres de mercure négligée est au maximum de $0^{mm},02$ (elle serait au maximum de $0^{mm},04$ pour 10 millimètres négligés). Or, dans les lectures de la pression on peut prétendre *au maximum* à l'exactitude à $0^{mm},05$ près. On ne peut considérer comme exact que le chiffre de dixièmes de millimètre, et cela, bien entendu, dans le cas seulement où l'on possède un excellent instrument et où les observations sont faites minutieusement.

Cette loi peut s'énoncer encore sous cette autre forme : la densité d'un gaz, à température constante, est proportionnelle à la pression qu'il supporte.

Les expériences de Despretz, Pouillet, Dulong et Arago, Regnault ont démontré que cette loi n'est pas générale, que les gaz sont inégalement compressibles, et que pour un même gaz la loi n'est pas rigoureusement exacte. L'acide sulfhydrique, l'ammoniaque, l'acide sulfureux, le cyanogène sont les gaz qui s'en écartent le plus. La compressibilité des gaz augmente avec la pression, mais faiblement. L'hydrogène seul fait exception; sa compressibilité décroît à mesure que la pression augmente.

De nombreuses expériences postérieures à celles de Regnault ont démontré que :

1° A la température ordinaire, la pression croissant d'une manière continue, il arrive un moment où la compressibilité des gaz présente un maximum; au delà de ce point, elle diminue malgré que la pression augmente; ce maximum est variable pour les différents gaz; il se produit à une pression de 65 mètres de mercure pour l'air, 50 mètres pour l'azote, 100 mètres pour l'oxygène, etc.;

2° Au-dessus d'une certaine température appelée *point critique*, les gaz ne sont plus liquéfiables et à cette température ils présentent pour une certaine pression; un maximum de compressibilité;

3° Aux températures supérieures au point critique les gaz se comportent comme l'hydrogène.

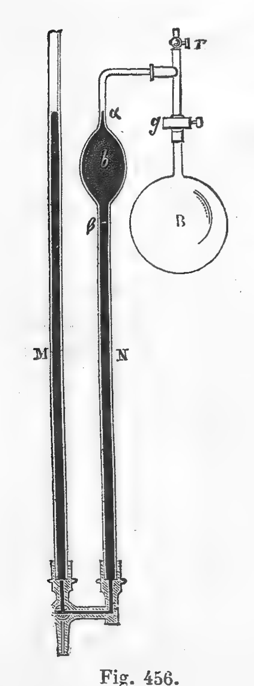


Fig. 456.

Manomètres. — Cette question ne sera pas traitée ici, les applications physiologiques de ces appareils étant décrites aux articles Cœur et Pression artérielle.

Voluménomètres. — Je ne parlerai ici que du voluménomètre de Regnault. Cet instrument permet :

1° De mesurer la capacité d'un récipient quelconque dans lequel on ne veut pas introduire de liquide;

2° De mesurer la densité d'un corps qu'on ne peut pas mettre en contact avec des liquides.

Ce voluménomètre est, en somme, un manomètre portant sur l'une de ses branches une ampoule b jaugée entre les deux repères α et β. Le récipient B dont on veut mesurer la capacité est ajusté à l'extrémité de cette branche du voluménomètre. On fait affleurer le mercure dans la branche N au repère α, et on mesure la pression à ce moment : ce sera la pression atmosphérique H si les robinets r et g sont ouverts; on ferme r; soit V le volume d'air contenu en B et entre α et B. On fait couler le mercure par le robinet R jusqu'à ce qu'il affleure en β dans la branche N. On mesure la différence h des niveaux du mercure; le volume v de l'ampoule étant connu, le nouveau volume

occupé par l'air qui remplissait le récipient B jusqu'en α est $V+v$ à la pression $H-h$; on a donc :

$$\frac{V}{V+v}=\frac{H-h}{H}$$

d'où

$$V=v\frac{H-h}{h}$$

Si l'on connaît au préalable l'espace αrg, on a facilement le volume du récipient B jusqu'au robinet g.

On suppose, bien entendu, que la température n'a pas varié pendant l'opération.

Ce procédé ne s'applique pas facilement à tous les cas qui peuvent se présenter dans les recherches biologiques.

Le voluménomètre que je décris plus loin est d'un usage très commode et m'a donné des résultats de la plus grande précision.

C'est un tube en Y communiquant par le tube C avec un réservoir à mercure mobile D, par un tube de caoutchouc ; les branches A et B sont parallèles ; la branche B porte un robinet à trois voies E. Les deux tubes A et B portent sur toute leur longueur une graduation en millimètres. Le tube A porte en outre une graduation en dixièmes de centimètre cube ; il est jaugé à partir du robinet E. Les deux graduations sont placées côte à côte, comme le montre la figure, et viennent presque s'affronter. Le tout est institué à demeure sur un bâti de bois, de manière que les tubes A et B soient verticaux, ce qui est très facile à l'aide d'un fil à plomb installé à côté des tubes.

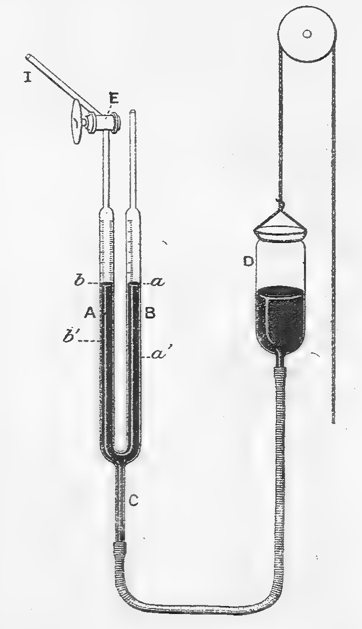


Fig. 457.

Le récipient dont on veut mesurer la capacité est relié au tube I ; le robinet E étant en communication avec le récipient, le gaz de ce dernier est mis à la pression atmosphérique.

On lit les positions a et b du mercure sur les échelles en millimètres et d'autre part le volume Eb ; on abaisse (ou on élève si l'on se trouve en bas du tube B) les niveaux du mercure et on lit les nouvelles positions des ménisques a',b' sur les échelles en millimètres, puis le volume Eb' ; on connaît ainsi les longueurs aa' et bb', et par suite la dénivellation du mercure $aa'-bb'$.

Connaissant aussi l'augmentation de volume bb' et le volume primitif Eb de

l'air dans la branche B du manomètre, on trouve facilement la capacité du récipient à l'aide de la formule indiquée plus haut.

Si l'on met de l'eau dans le manomètre au lieu de mercure, les mesures se font avec une grande exactitude, les erreurs dans l'évaluation de la pression étant plus de 13 fois plus petites; mais il faut faire des dénivellations plus considérables pour avoir une augmentation de volume assez sensible (1).

Lorsqu'on se sert du mercure, on peut avec de l'habitude faire de bonnes lectures à l'œil; quand on veut avoir plus de précision, on se sert d'un viseur muni d'un vernier au vingtième (2).

Il est parfaitement inutile de chercher, dans la mesure du volume et des dénivellations du mercure, plus de précision qu'on peut en obtenir avec ces viseurs parce que, *toujours*, la variation de volume de la masse gazeuse sous l'influence de la température (même lorsque le récipient qui contient cette masse gazeuse est plongé dans l'eau, comme je l'ai toujours fait), pendant qu'on fait les lectures, est plus considérable que l'erreur de lecture et même souvent beaucoup plus.

J'ai décrit ce procédé parce qu'il supprime l'emploi du cathétomètre, instrument qui n'existe que très rarement dans les laboratoires des biologistes. Ensuite, pour la raison que je viens d'indiquer plus haut, il permet d'obtenir des mesures qui ne sont pas plus entachées d'erreur que celles faites avec un cathétomètre.

Ce voluménomètre est de la plus grande utilité dans les recherches sur la respiration des tissus animaux ou végétaux, pour connaître le volume d'une atmosphère en contact avec un fragment de tissu, avec une plante, etc.

Lorsque l'on a à mesurer la capacité d'appareils pour lesquels ce voluménomètre ne suffit pas, le procédé suivant donne d'excellents résultats. On met l'enceinte dont on veut déterminer le volume en communication avec un manomètre contenant de l'eau. On supprime la communication de l'enceinte avec l'extérieur, puis on en extrait un certain volume d'air de manière à avoir une dénivellation de 10 ou 20 centimètres d'eau dans le manomètre. On mesure avec précision l'air extrait (3) et la dépression dans le manomètre; on ramène cette dépression en hauteur de mercure et on calcule le volume de l'enceinte au moyen de l'équation $V = v\frac{H-h}{h}$, v étant le volume d'air extrait et h la dépression du manomètre à eau, évaluée en millimètres de mercure.

Ce procédé suppose une enceinte parfaitement hermétique et dont les parois sont assez rigides pour ne pas se déformer sous l'influence de la dépression. Il s'applique aux chambres respiratoires, calorimètres, etc.

(1) Il y a dans ce cas l'inconvénient de la dissolution (en quantité variable avec la pression) des gaz dans l'eau; mais cette erreur est sensiblement négligeable si la variation de pression n'est pas considérable.

(2) La tige le long de laquelle glisse ce viseur doit être parfaitement verticale. On doit, du reste, vérifier, l'horizontalité du plan passant par l'œilleton et le cheveu du viseur.

(3) Cette mesure se fait très rapidement et avec beaucoup plus de précision qu'il n'en faut ici par le procédé décrit dans ce volume.

Mesure de la densité d'un corps. — Elle se fait très simplement avec un voluménomètre quelconque. On détermine le volume V de l'air contenu dans un récipient par le procédé décrit plus haut ; puis on y introduit le corps dont on veut calculer la densité et on détermine à nouveau le volume V′ de l'air qu'il contient ; la différence V—V′ donne le volume du corps (on suppose que la température n'a pas varié du commencement à la fin de l'opération). Connaissant le poids du corps, on a sa densité.

MÉLANGE DES GAZ

Deux ou plusieurs gaz mis en présence se mélangent toujours complètement au bout d'un temps plus ou moins long (expérience de Berthollet).

Loi de Dalton. — *Dans un mélange de plusieurs gaz n'ayant les uns sur les autres aucune action chimique, la force élastique du mélange est égale à la somme des forces élastiques des différents gaz, considérés comme occupant chacun le volume total.*

Comme application de cette loi, je citerai le mode d'analyse suivant employé par Regnault : soit à faire l'analyse d'un mélange d'oxygène et d'acide carbonique occupant le volume V à la pression P. On absorbe l'acide carbonique par un alcali, puis on ramène le volume du gaz restant au volume V, en diminuant la pression de P à p. L'acide carbonique occupant le volume V était à la pression $P-p$; à la pression p son volume serait $\frac{V(P-p)}{p}$. Les volumes des deux gaz sont donc dans le rapport

$$\frac{V}{\frac{V(P-p)}{p}}=\frac{p}{p-P}.$$

L'analyse se réduit donc à des mesures de pression et ne nécessite pas l'emploi d'appareils volumétriques gradués, ou évite les erreurs tenant à ces appareils.

SOLUBILITÉ DES GAZ DANS LES LIQUIDES

Les gaz sont solubles dans les liquides en proportion différente. Cette proportion dépend à la fois de la nature du gaz, de la nature du liquide et de la pression.

Loi de Henry (loi de la dissolution des gaz dans les liquides). — *Dans une solution gazeuse en équilibre à une température donnée, il existe un rapport constant entre la tension du gaz dissous et la tension du gaz extérieur.*

Ce rapport β est le coefficient de solubilité du gaz dans le liquide.

Cette loi n'est pas absolue. Elle ne convient qu'aux gaz peu solubles et pour des pressions peu considérables. Pour les gaz très solubles, l'acide sul-

fureux et l'ammoniaque, par exemple, la proportionnalité n'existe pas, et l'écart est d'autant plus grand que la température est moins élevée.

D'une manière générale, la solubilité d'un gaz dans un liquide diminue lorsque sa température s'élève.

Loi de Dalton. — *Lorsque plusieurs gaz sont mis en présence d'un liquide, chacun d'eux se dissout comme s'il était seul.*

Cette loi sert de base à une méthode d'analyse des gaz établie par Bunsen; cette méthode permet l'analyse *qualitative* et *quantitative* d'un mélange gazeux. Les opérations se font dans un appareil spécial imaginé par Bunsen, l'*absorptiomètre*.

Le principe de cette méthode est le suivant :

On introduit dans une éprouvette graduée un volume u_0 du mélange gazeux (1), à une pression P, et on le met en présence d'un volume connu w d'un liquide absorbant, eau purgée de gaz, ou autre. On agite, puis on mesure le résidu gazeux u, et la pression y ; on répète trois fois l'opération en mesurant chaque fois le volume initial u_1, u_2, u_3, la pression initiale P, P_1, P_2, la pression finale y_1, y_2, y_3, le volume du liquide absorbant w_1, w_2, w_3.

Si $P = P_1 = P_2$, les quatre équations suivantes

$$u_0 = v + v'.$$

$$y_1 = \left(\frac{v}{\beta w_1 + u_1} + \frac{v'}{\beta' w_1 + u_1}\right) P$$

$$y_2 = \left(\frac{v}{\beta w_2 + u_2} + \frac{v'}{\beta' w_2 + u_2}\right) P_1$$

$$y_3 = \left(\frac{v}{\beta w_3 + u_3} + \frac{v'}{\beta' w_3 + u_3}\right) P_2$$

donneront les volumes respectifs v et v' des deux gaz et leurs coefficients de solubilité β et β'. En se reportant aux tables de solubilité, on trouvera facilement les gaz qui ont β et β' pour coefficient de solubilité et on connaîtra leur nature.

Les gaz peuvent se dégager d'une dissolution par trois procédés différents:

1° Par échauffement ;

2° Par congélation ;

3° Par diminution de pression.

La chaleur de dissolution des gaz dépasse leur chaleur de liquéfaction ; la différence est la plus grande pour les gaz très solubles ; ainsi pour le gaz ammoniac, sa chaleur de liquéfaction est de 4,4, et celle de dissolution 8.

La dissolution des gaz par les solutions salines est un phénomène plus complexe, qui tient à la fois de la dissolution simple et de la combinaison chimique.

(1) Nous supposerons le cas le plus simple, celui du mélange de deux gaz, dont les coefficients de solubilité sont β et β'.

OCCLUSION DES GAZ

On appelle occlusion la propriété que possèdent certains corps, les métaux en particulier, d'absorber et de condenser les gaz. C'est un phénomène qui a beaucoup d'analogie avec la dissolution des gaz dans les liquides. Ainsi, comme la dissolution, l'occlusion est élective ; un même corps peut occlure des quantités très variables des différents gaz. L'argent en poudre retient en moyenne 7 volumes d'oxygène, $0^{vol},9$ d'hydrogène, $0^{vol},5$ d'acide carbonique et $0^{vol},15$ d'oxyde de carbone.

Le gaz occlus change de propriétés, ainsi que le corps qui l'a occlus ; ainsi, l'hydrogène occlus par le palladium possède des affinités plus énergiques que l'hydrogène libre ; d'un autre côté, la densité, la ténacité et la conductibilité électrique diminuent dans le palladium, et il acquiert des propriétés magnétiques.

Tous les corps solides possèdent à un degré variable la propriété d'occlure les gaz, particulièrement les corps pulvérulents; lorsqu'on les plonge dans une atmosphère gazeuse, ils en retiennent à leur intérieur ou à leur surface une portion variable. Ainsi la poudre de verre absorbe une quantité notable de gaz qu'elle retient en partie même dans le vide : il en résulte une diminution apparente de son pouvoir absorbant.

Le charbon de bois absorbe, avec dégagement de chaleur, des quantités considérables de gaz ; d'après Th. de Saussure, 1 volume retient à la température ordinaire :

Ammoniaque	90 vol.
Acide chlorhydrique	85 —
Acide sulfureux	65 —
Acide sulfhydrique	55 —
— carbonique	35 —
Oxygène	9,25 vol.
Azote	7,50 —
Hydrogène	1,75 —

Pour l'acide carbonique, la condensation du gaz est telle qu'il doit se trouver dans le charbon à un état voisin de l'état liquide.

Mais les métaux sont les corps qui possèdent au plus haut degré la propriété de condenser les gaz. C'est le palladium qui est le métal le plus remarquable à ce point de vue. Un morceau de ce métal forgé absorbe 643 fois son volume d'hydrogène à 95°. La mousse de palladium ainsi que la mousse de platine possèdent cette propriété à un plus haut degré encore. L'occlusion de gaz se fait avec un dégagement de chaleur considérable dans ces deux derniers cas (briquet à hydrogène).

La fonte retient surtout de l'hydrogène, le fer de l'oxyde de carbone, l'argent de l'oxygène, etc.

L'occlusion est indépendante de la surface du métal.

DIFFUSION DES GAZ

On appelle diffusion la pénétration réciproque que présentent deux gaz mis en présence, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un diaphragme poreux.

Diffusion sans diaphragme. — Si dans le cas le plus simple on met, comme dans l'expérience de Berthollet, deux gaz en contact, le plus dense en bas, ils finissent par se mélanger d'une façon intime, et le mélange présente la même composition dans tous les points.

Le coefficient de diffusibilité K d'un gaz est la quantité de ce gaz en centimètres cubes qui, à l'état stationnaire, traverse en une seconde une surface de 1 centimètre carré dans le deuxième gaz, quand dans l'espace de 1 centimètre la pression du premier gaz décroît de 1 à 0, tandis que celle du deuxième croît de 0 à 1, la température étant 0.

Voici, d'après Locshmidt, la valeur de K pour quelques gaz (1) :

		k.
Acide carbonique. —	Hydrogène	0,558
—	Air	0,142
—	Oxygène	0,141
—	Oxyde de carbone	0,140
—	Protoxyde d'azote	0,098
Oxygène. —	Hydrogène	0,722
—	Oxyde de carbone	0,180
Oxyde de carbone. —	Hydrogène	0,642

La diffusion s'accélère avec la température.

Diffusion avec diaphragme. — On peut envisager quatre cas différents :

1° Le diaphragme qui sépare les deux gaz est une *lame mince* de platine percée d'un *orifice très étroit.*

La loi du phénomène appelé dans le cas EFFUSION est la suivante :

La vitesse de passage de chaque gaz est en raison inverse de sa densité.

2° Le diaphragme est une *lame épaisse* traversée par un *canal très étroit.*

Graham nomme ce phénomène : *Transpiration.* La loi de l'effusion ne s'applique plus à ce cas ou ne s'y applique que lorsque la longueur du canal capillaire dépasse quatre mille fois son diamètre. Sauf ce dernier cas, les vitesses d'écoulement ne présentent pas entre elles de rapport constant.

3° Le diaphragme est *poreux.* — On retrouve ici la loi de l'effusion : *Les vitesses du passage des différents gaz à travers une cloison poreuse sont en raison inverse des racines carrées des densités.*

La loi ne se vérifie d'une façon absolue que dans le cas d'un diaphragme de graphite comprimé ou du biscuit de porcelaine dense. Dans le cas des autres corps poreux, terre cuite, plâtre, etc., il y a superposition de deux phénomènes, transpiration et effusion.

(1) En unités C.G.S.

La diffusion à travers un tampon d'asbeste a pu permettre de séparer partiellement l'ammoniaque de l'acide chlorhydrique dans la vapeur de chlorhydrate d'ammoniaque.

Pour qu'il y ait diffusion, il n'est pas indispensable qu'il y ait pression du côté du gaz considéré.

Ainsi de l'hydrogène, étant à une pression plus faible que l'air, diffusera quand même dans cet air à travers une paroi poreuse.

Inversement, les gaz mélangés se séparent les uns des autres suivant leur vitesse de diffusion respective (*atmolyse*). Si l'on fait passer un courant d'air dans un tuyau de pipe placé dans l'axe d'un tube où l'on fait le vide, et qu'on analyse l'air à la sortie du tuyau, on voit qu'il contient 24,5 p. 100 d'oxygène au lieu de 21 p. 100 (tube atmolyseur de Graham).

Pénétration. — C'est le passage des gaz à travers des corps qui ne présentent pas de pores visibles.

Pénétration à travers le caoutchouc. — Les divers gaz traversent ce corps avec des vitesses relatives différentes que donne le tableau suivant :

	Vitesse de pénétration.
Azote	1
Oxyde de carbone	1,113
Air atmosphérique	1,149
Gaz des marais	2,148
Oxygène	2,556
Hydrogène	5,500
Acide carbonique	13,585

Un ballon de caoutchouc rempli d'air et plongé dans une atmosphère d'hydrogène se distend peu à peu jusqu'à éclater ; l'inverse se produit pour un ballon distendu par de l'hydrogène et placé dans l'air.

Pénétration à travers les liquides. — D'après Exner, la quantité de gaz qui traverse une membrane liquide est sensiblement proportionnelle au coefficient de solubilité du gaz dans le liquide, et en raison inverse de la racine carrée de la densité des gaz. Von Wroblewski ajoute que cette quantité est proportionnelle à la pression H et à la racine carrée du temps que ce gaz a mis à se dissoudre.

Pénétration à travers les métaux. — Ce phénomène présente un rapport intime avec l'occlusion des gaz par les métaux.

Expérience de Sainte-Claire Deville et Troost. — Un tube de platine traverse suivant l'axe un tube de porcelaine fermé à ses deux extrémités, et le tout est porté au rouge. Le tube de platine est traversé par un courant d'air sec et le tube de porcelaine par un courant d'hydrogène sec. On constate que, vers 1100 degrés, il ne sort plus du tube de platine que de l'azote et de la vapeur d'eau : ce métal ne se laisse pas traverser par un autre gaz que l'hydrogène ; il y a donc là une action élective en rapport avec les phénomènes d'occlusion. Le palladium présente des propriétés semblables.

La fonte chauffée au rouge se laisse traverser par l'oxyde de carbone, fait qui explique les malaises fréquents causés par les poêles de fonte.

DISSOCIATION

C'est un mode particulier de la décomposition des corps. L'exemple suivant fera comprendre le phénomène mieux qu'une définition.

La vapeur d'eau chauffée à une température très élevée, 1000°, par exemple, subit un commencement de décomposition. Une partie de la vapeur d'eau s'est décomposée en hydrogène et oxygène. Mais cette décomposition s'arrête lorsque la tension du mélange de ces gaz atteint une certaine valeur f. Si l'on porte la température à 1200°, par exemple, la décomposition recommence et ne s'arrête que lorsque la tension du mélange a atteint une nouvelle valeur f'. Si, inversement, on fait revenir la température de 1200° à 1000°; une partie des gaz mis en liberté se recombine jusqu'à ce que la tension du mélange soit revenue à la valeur f. Ce mode de décomposition, limité pour une température donnée T, est appelé *dissociation*, et la tension f des gaz mis en liberté à cette température T est appelée *tension de dissociation* pour cette température.

La vapeur d'eau se décomposant déjà à une température de 1000°, alors que la chaleur dégagée par la combinaison de deux volumes d'hydrogène avec un d'oxygène est d'environ 2500°, on en conclut qu'un corps peut se décomposer partiellement à une température bien inférieure à celle de sa formation.

On voit aussi qu'il est possible de former un corps ou de le composer à une même température T. En effet, si le corps n'est pas décomposé en vase clos, et que les gaz auxquels il donne naissance se dégagent librement, c'est-à-dire sans jamais pouvoir atteindre la tension de dissociation pour la température T, le corps se décomposera indéfiniment jusqu'à la dernière parcelle. Si, au contraire, on maintient en vase clos et à la température T les gaz qui peuvent donner naissance à ce corps, mais à une tension supérieure à la tension f de dissociation pour la température T, ces gaz se combineront jusqu'à ce que leur tension ait atteint la valeur f de la tension de dissociation.

Ces principes étant posés, je passerai sur les expériences classiques de H. Sainte-Claire Deville et qui sont exposées dans tous les traités de chimie, pour parler des applications de la théorie de la dissociation.

Cette théorie nous explique, sans qu'il soit besoin d'insister davantage, après ce qui a été dit plus haut, l'influence de la pression sur les réactions chimiques. Elle nous donne la clef de certains phénomènes auparavant mal expliqués. Ainsi, nous savons pourquoi un courant de gaz inerte provoque la décomposition d'une solution de bicarbonate. Cette solution ayant une faible tension de dissociation à la température ordinaire, le courant de gaz inerte a pour effet de renouveler sans cesse l'atmosphère chargée d'acide carbonique qui est en contact avec la solution, et par suite d'abaisser la tension de cet acide carbonique. Or, d'après ce qui a été dit plus haut, la décomposition du bicarbonate se continuera tant que la tension de l'acide carbonique n'aura

pas atteint la valeur de la tension de dissociation ; c'est-à-dire que le bicarbonate se décomposera totalement en carbonate neutre (qui n'a pas de tension de dissociation), si le courant de gaz inerte ne cesse pas (1).

Le même raisonnement est applicable à la décomposition des sulfures et d'un grand nombre de corps.

Ce que nous savons sur la dissociation nous permet de distinguer les phénomènes de dissolution d'un gaz dans un liquide ou dans un solide.

Les expériences de M. Isambert sont concluantes à ce sujet : on chauffe dans le vide un morceau de charbon de bois préalablement saturé de gaz ammoniac ; une fois l'équilibre établi, on extrait le gaz en faisant le vide, puis on continue le chauffage à la même température ; on mesure alors la nouvelle tension et on voit qu'elle est plus faible que l'autre et qu'elle baisse par la suite d'une manière continue à chaque opération. Le charbon s'est donc comporté comme une solution de gaz ammoniac. Donc les tensions observées ne sont pas des tensions maxima comme les tensions de dissociation ; elles dépendent uniquement de l'espace occupé par le gaz à une même température, tandis que la tension de dissociation est indépendante du volume du gaz.

C'est par le même procédé que Troost et Hautefeuille ont pu établir que le palladium forme avec l'hydrogène un composé défini Pd^2H qui lui-même dissout l'hydrogène.

Ainsi du palladium fondu absorbe 800 ou 900 fois son volume d'hydrogène : si on le chauffe à plusieurs reprises à 100°, la tension de l'hydrogène diminue progressivement jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur de 230 millimètres. A ce moment, le palladium ne contient plus que 600 volumes de gaz, et si on continue à le chauffer à 100°, la tension reste la même, malgré qu'on enlève du gaz, et cela jusqu'à ce que tout l'hydrogène ait été chassé du palladium. On a donc affaire ici à une tension de dissociation, et par suite à un composé défini.

(1) La solution de bicarbonate de potasse a une tension de dissociation qui peut être mise en évidence, mais le bicarbonate de potasse sec a une tension de dissociation nulle à la température ordinaire et peut pour cette raison se conserver sans altération.

ANALYSE DES GAZ

ANALYSE SUR LA CUVE A MERCURE. EUDIOMÈTRES DE PRÉCISION

Par M. J. TISSOT

Je décris dans ce chapitre deux procédés d'analyse. L'un d'eux, qui est d'un usage courant dans les laboratoires, consiste dans la méthode de Bunsen modifiée ; ce procédé, comme on le verra plus loin, ne peut donner que des résultats approximatifs. Si l'on voulait avoir un bon résultat, il faudrait suivre ponctuellement les indications de la méthode de Bunsen, sans modifications. Mais, dans ce cas, l'analyse devient plus longue qu'avec les eudiomètres de précision et il vaut mieux, par suite, avoir recours à ces derniers, qui présentent toutes les garanties d'exactitude, et qui constituent le deuxième des procédés dont j'ai parlé plus haut.

ANALYSE SUR LA CUVE A MERCURE

Je ne m'arrêterai pas à toutes les formes d'eudiomètre qui ont été proposées et j'en décrirai une seule qui m'a paru la plus parfaite et qui permet de faire les analyses rapidement et avec une exactitude suffisante dans beaucoup de cas.

Voici la description de cet eudiomètre qui est employé dans le laboratoire de M. Chauveau et qui a été construit d'après ses indications (fig. 458) :

Une cuve à mercure A, fixée sur une table de bois B, porte à sa partie inférieure, et communiquant avec elle, deux tubes *cc'*, d'un diamètre de $0^m,03$ et de $0^m,80$ de longueur (1). Cette cuve est en outre munie de deux glaces D,D', et porte deux lames métalliques EE', sur lesquelles sont fixées deux tiges mobiles F,F' par le mécanisme suivant :

Sur la lame de cuivre E est soudé un tube creux A, ainsi qu'une borne B portant à son intérieur un pas de vis ; dans ce dernier s'engage une vis très longue C dont l'extrémité D vient s'appliquer à l'intérieur et à la partie supérieure du tube F. Ce tube F s'adapte exactement sur le tube A et glisse sur lui avec un très léger frottement. C'est sur le tube F que sont fixés les supports des tubes eudiométriques. On conçoit facilement qu'en manœuvrant la vis C on puisse élever le tube F et tout le système qui lui est

(1) Ces tubes sont destinés à recevoir les tubes eudiométriques qui, sans eux, nécessiteraient l'emploi d'une cuve à mercure très profonde.

adapté. En manœuvrant la vis en sens inverse, tout le système descend en vertu de son propre poids.

Sur les tubes F,F′ sont placées deux pinces G, G′, destinées à supporter les

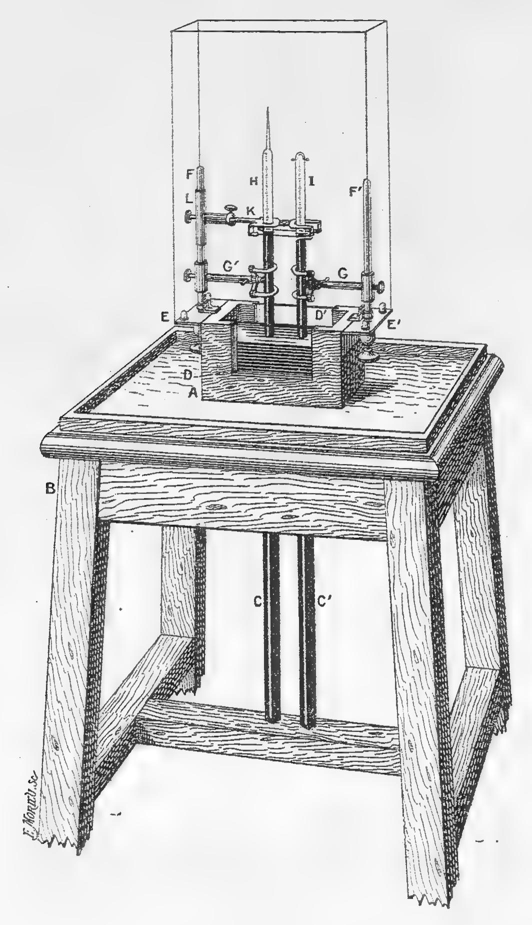


Fig. 458.

tubes eudiométriques H,H′. Ces deux pinces, d'un usage très commode (fig. 459), se composent de deux griffes H,H′ recourbées et formant un angle dans lequel la tige I vient appliquer le tube eudiométrique. Toutes ces parties sont recouvertes de caoutchouc afin d'éviter toute rayure sur les tubes ; la tige I appuie le tube eudiométrique contre les griffes H,H′ au moyen d'un ressort à boudin K, et elle est manœuvrée au moyen de deux petites tiges latérales LL′ qui glissent dans les deux rainures correspondantes M. Les tubes eudiométriques étant fixés dans les pinces, on conçoit donc facilement comment on peut les élever ou les abaisser en manœuvrant la vis C.

A la tige F est adapté un viseur K (fig. 458 et 460) ; ce viseur se compose

d'une pièce L servant de support, reliée à une autre pièce K par un assemblage à genou M. La pièce K est elle-même formée d'une plaque de cuivre N portant en O un trou pour le passage du comparateur, et en P une échancrure pour le passage de l'autre tube eudiométrique. Aux quatre angles de cette plaque sont fixées des tiges R ayant exactement la même longueur, et portant deux crins ou deux cheveux parallèles S,S'.

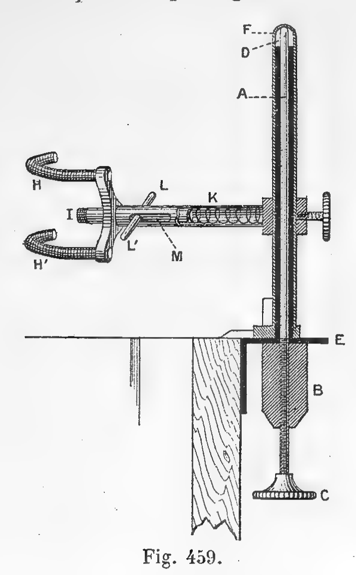


Fig. 459.

La plaque N et par suite les deux crins peuvent être mis et maintenus horizontaux au moyen d'un système de trois tubes verticaux ouverts, contenant du mercure et communiquant entre eux. Les sommets des ménisques de mercure déterminent un plan horizontal si les axes des trois tubes sont situés dans deux plans différents. On fait coïncider le plan passant par les deux crins avec le plan passant par les sommets des trois ménisques.

Le plan horizontal déterminé par les deux crins doit toujours passer par une division connue et déterminée d'avance du tube H (fig. 458).

Comme la figure le montre, on emploie dans cet instrument deux tubes eudiométriques. L'un d'eux, celui de droite, sert aux mesures et aux manipulations à effectuer sur le gaz en expérience, à l'analyse, en un mot. L'autre, celui de gauche, représente le dispositif déjà employé par Williamson et Russel pour effectuer rapidement, exactement et automatiquement les corrections de température, de pression et de tension de la vapeur d'eau. On l'appelle *comparateur*. C'est un tube absolument semblable au tube de droite destiné à l'analyse, mais qui en diffère par son extrémité effilée. Cette extrémité permet d'introduire exactement dans le tube un volume de gaz déterminé d'avance.

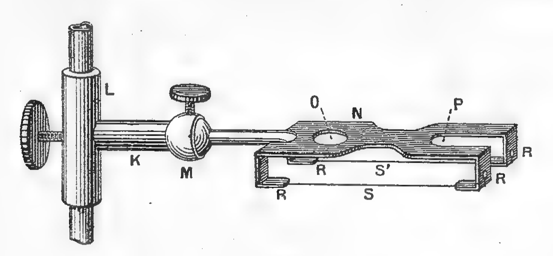


Fig. 460.

Voici la manière de construire le comparateur ainsi que la manière de s'en servir. Le tube H étant rempli de mercure et immergé complètement dans la cuve à mercure, on met son extrémité effilée en communication avec un réservoir contenant de l'azote ou de l'hydrogène pur, au moyen d'un tube de

caoutchouc de calibre intérieur très minime (1). Cela fait, on élève lentement et progressivement le tube H, jusqu'à ce que l'on ait le volume désiré, mesuré à la pression atmosphérique. Si l'on veut enfermer, je suppose, 10 centimètres cubes d'hydrogène pur dans le comparateur (ces 10 centimètres cubes étant mesurés à 760 millimètres et à l'état sec), on calcule quel est le volume de cette masseg azeuse saturée d'humidité, à la pression et à la température ambiante au moment où on l'enferme dans le tube H. Le volume étant connu, soit, je suppose, 11 centimètres cubes, on sature le gaz d'humidité en introduisant une très faible quantité d'eau dans le comparateur. Cela fait, on élève ou on abaisse le tube H de telle manière que, le niveau du mercure à l'intérieur de ce tube étant le même que celui du mercure de la cuve, le sommet du ménisque affleure à la division 11,5 (2). Ce résultat étant obtenu, on obture à la flamme l'extrémité effilée du tube (3).

Il est facile de voir maintenant que, lorsqu'on voudra faire automatiquement les corrections de température, pression et tension de la vapeur d'eau sur cette masse gazeuse, il suffira de lui faire subir une modification qui ramène son volume à 10 centimètres cubes. Cette correction s'effectue en modifiant la pression à laquelle est soumis le gaz. Comme il faut lui faire subir une pression supérieure à la pression atmosphérique, et que, par suite, l'abaissement du ménisque au-dessous du niveau du mercure dans la cuve rend les lectures impossibles, on est obligé d'avoir recours au procédé suivant, qui du reste présente d'autres avantages :

On soumet le gaz à une dépression telle que son volume augmente de 1/5 ou 1/10 ; si l'augmentation est de 1/5, le volume du gaz devra être ramené à chaque mesure à 12 centimètres cubes $\left(10+\frac{10}{5}=12\right)$; et l'on saura que ce volume est trop fort de 1/5 (4).

Quand on voudra faire automatiquement sur un gaz les corrections de température, pression et tension, de la vapeur d'eau, on exécutera sur lui la même manœuvre que sur la masse gazeuse du comparateur. La correction étant faite au préalable dans ce dernier, on amènera le niveau du ménisque dans le tube I, à la hauteur du ménisque du comparateur. On n'aura plus qu'à diminuer le volume lu de 1/5.

(1) On a eu, au préalable, bien entendu, la précaution de chasser tout l'air du tube de caoutchouc et de le remplacer par du gaz inerte. Il vaut mieux employer l'hydrogène, qu'il est beaucoup plus facile d'obtenir pur et en grande quantité, que l'azote.

(2) Il est impossible de faire la mesure d'une autre manière, mais elle est entachée d'erreur. Le volume lu est trop faible, car il n'est pas tenu compte de la capillarité qui a pour effet d'abaisser le ménisque de mercure au-dessous du niveau de la cuve.

(3) Cette opération n'est pas une cause d'erreur, car elle est très rapide et se fait sur un tube assez long et *capillaire*. L'air n'a pas le temps de s'échauffer jusque dans la portion inférieure plus large. D'autre part, la dilatation de l'air contenu dans la partie capillaire est absolument nulle, le volume de cette partie étant un peu plus de $0^{cc},002$. On doit fermer non l'extrémité du tube capillaire, mais une partie voisine de l'extrémité, en dessous du tube de caoutchouc qui doit rester en communication avec le réservoir d'hydrogène pendant l'opération.

(4) On peut aussi faire le comparateur en y introduisant un volume quelconque de gaz, environ 10^{cc}, puis en faisant ensuite la mesure exacte de ce volume, et en le déprimant ensuite de 1/5. On devra alors affleurer le viseur en un point qui n'est pas marqué par un trait de la graduation. L'avantage de l'autre méthode est précisément de pouvoir établir plus facilement et exactement la position du viseur.

Les tubes eudiométriques employés, comparateur et tube à analyse, doivent être absolument identiques. Un tube de 1 centimètre de diamètre intérieur et de 40 centimètres de longueur représente un des modèles les plus commodes.

Si l'analyse de l'oxygène est faite par la méthode de l'explosion, le tube doit porter à sa partie supérieure deux électrodes en platine.

Il est toujours bon de vérifier le jaugeage des tubes et d'établir, s'il y a lieu, une table ou une courbe de correction. Mais dans la plupart des cas cette vérification sera inutile, car, presque toujours, le même tube sert à faire des analyses comparatives, et non des mesures exactes en valeur absolue. Dans ce dernier cas, on doit avoir recours aux eudiomètres de précision.

L'instrument que je viens de décrire est d'un usage commode, facile, et permet de faire des analyses avec assez de rapidité. Il ne me reste que quelques mots à dire sur les réactifs employés et sur les précautions à prendre pour faire une bonne analyse.

Il est plus simple et plus rapide de faire toutes les mesures sur le gaz ou le mélange gazeux saturé d'humidité que sur le gaz sec. Les détails que j'ai donnés antérieurement sur le comparateur impliquent du reste des mesures sur des gaz humides.

Je ne m'occuperai que du cas d'un mélange gazeux composé d'azote, d'oxygène et d'acide carbonique. On a rarement l'occasion, en effet, dans les recherches biologiques, de s'occuper de gaz d'une nature différente.

On trouvera facilement, du reste, dans les traités d'analyse les manœuvres complémentaires à effectuer dans le cas de la présence d'autres gaz tels que hydrogène sulfuré, oxyde de carbone, protocarbure d'hydrogène, etc. (1).

Pour faire l'analyse d'un mélange gazeux composé d'azote, oxygène et acide carbonique, on absorbe l'acide carbonique par la potasse, l'oxygène par le pyrogallate de potasse ou le phosphore, ou en le faisant détoner avec de l'hydrogène. Disons quelques mots de chacun de ces réactifs.

Potasse. — L'acide carbonique doit être absorbé en introduisant dans le tube eudiométrique une faible quantité (de $0^{cc},3$ à $0^{cc},5$) d'une solution de potasse ou de soude dont la concentration ne dépasse pas le titre de 7 à 8 p. 100. C'est seulement à partir et au-dessous de cette concentration que les solutions de potasse et de soude émettent à peu près la même quantité de vapeur d'eau que l'eau pure ; on ne doit donc pas dépasser le titre indiqué si l'on veut faire des mesures sur des gaz saturés d'humidité.

Fig. 461.

On doit absolument rejeter la méthode qui consiste à introduire dans le tube eudiométrique une pastille de potasse avec quelques gouttes d'eau, car la mesure qui suit cette opération est faite sur un gaz partiellement des-

(1) Voy. à ce sujet : GRÉHANT, *Les gaz du sang*, Paris, G. Masson. — OGIER, *Analyse des gaz*. (*Encyclopédie chimique*, t. IV).

séché, alors que la mesure précédente était faite sur un gaz saturé d'humidité.

La solution de potasse préparée d'avance est recueillie dans une seringue du modèle ci-contre (fig. 461) qui permet d'introduire exactement et très commodément la quantité voulue dans le tube eudiométrique. L'extrémité A de la seringue est fermée par un tube de caoutchouc B.

Acide pyrogallique. — L'emploi de ce réactif est fondé sur la propriété du pyrogallate de potasse d'absorber énergiquement l'oxygène lorsqu'il est mis en sa présence. Le pyrogallate de potasse se fait dans le tube eudiométrique en y introduisant séparément la potasse et l'acide pyrogallique. Si le gaz en expérience contient de l'oxygène, le mélange prend de suite une teinte noire foncée. L'agitation favorise l'absorption de l'oxygène ; mais elle doit se faire sans sortir le tube de la cuve à mercure. Le procédé qui consiste à agiter le tube hors de la cuve en maintenant son orifice fermé avec le doigt, est mauvais et expose à une rentrée d'air ou à une sortie de gaz ; on doit le rejeter.

La plus grande partie de l'oxygène est absorbée au bout de cinq minutes par le pyrogallate de potasse. Mais il en reste cependant une faible portion qui ne s'absorbe que lentement et qui met plus d'une heure à disparaître.

On sait aussi que, tout en absorbant l'oxygène, le pyrogallate de potasse dégage de l'oxyde de carbone. Cette cause d'erreur est négligée sous le prétexte qu'elle est presque nulle. Si l'on examine les chiffres donnés à ce sujet par Calvert (1), Clœz (2) et Boussingault (3), on voit qu'elle n'est pas ou qu'elle peut ne pas être négligeable. Clœz, en absorbant 320 centimètres cubes d'oxygène par 2 grammes d'acide pyrogallique et 4 grammes de potasse, a constaté un dégagement de 11^{cc},4 d'oxyde de carbone, c'est-à-dire 3,4 p. 100 de la quantité d'oxygène absorbée. Dans d'autres mesures, Calvert a constaté un dégagement d'oxygène de 2 p. 100 de la quantité d'oxygène absorbée. On voit donc que si, dans une analyse, il peut se produire une erreur de cette grandeur, elle est loin d'être négligeable.

En joignant à cet inconvénient celui de ne pas pouvoir distinguer le sommet du ménisque de mercure après l'absorption de l'oxygène, par suite de la coloration noire du pyrogallate de potasse, on arrive à conclure que la méthode est mauvaise et qu'il faut la rejeter. Il est bien préférable d'employer la méthode par détonation qui n'est pas plus longue, qui est exacte, et qui permet de faire les lectures sur un ménisque net.

Si l'on emploie l'acide pyrogallique, on en fait une solution saturée, dans de l'eau bouillie. On conserve cette solution dans une seringue analogue à celle décrite pour conserver la solution de potasse.

Phosphore. — Il est employé dans quelques cas, et avec succès ; c'est un procédé préférable à celui du pyrogallate de potasse. Le phosphore doit toujours être employé à l'état humide ; on le trouve en bâtons ou en boules. L'absorption de l'oxygène ne se produit rapidement qu'aux températures supérieures à 10°.

(1) Calvert, *C. R.*, LVII, p. 873.
(2) Clœz, *C. R.*, LVII, p. 875.
(3) Boussingault, *C. R.*, LVII, p. 885.

L'absorption de l'oxygène par le phosphore se fait mal en présence de l'acide carbonique; aussi doit-on toujours traiter un gaz par la potasse avant de le traiter par le phosphore; elle se fait mal ou pas du tout lorsque la tension de l'oxygène dépasse 40 p. 100 de celle du mélange gazeux.

Hydrogène. — On prépare facilement de l'hydrogène pur et en grande quantité en traitant le zinc pur par l'acide chlorhydrique pur (1). On le fait passer dans un laveur contenant une solution de potasse pour retenir l'acide chlorhydrique entraîné et on le recueille sur la cuve à mercure.

Le dosage de l'oxygène se fait en y ajoutant un peu plus de deux fois son volume d'hydrogène et en faisant passer l'étincelle dans le mélange; les deux gaz se combinent dans la proportion de 1 volume d'oxygène pour 2 volumes d'hydrogène; le volume de l'oxygène correspond donc au tiers du volume total disparu.

Si l'on ne connaît pas approximativement, avant l'analyse, la composition du gaz en expérience, il est nécessaire de faire une analyse au pyrogallate de potasse, sans rechercher l'exactitude; on connaît ainsi à peu près la quantité d'oxygène contenu dans le mélange; on ajoute alors à ce dernier un volume d'hydrogène égal à un peu plus de deux fois le volume de l'oxygène.

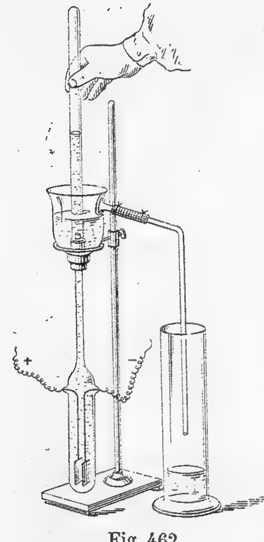


Fig. 462.

Dans le cas où l'on aurait ajouté trop d'hydrogène, et où la combustion ne se produirait pas, ou incomplètement, on n'a qu'à ajouter au mélange un volume quelconque de *gaz de la pile*, jusqu'à ce que la détonation se produise. On n'a pas à tenir compte du gaz de la pile ajouté, puisque ce gaz détone, comme on le verra plus loin, sans laisser de résidu.

Gaz de la pile. — C'est un mélange d'hydrogène et d'oxygène dans lequel ces deux gaz sont dans le même rapport de volume que dans l'eau. Lorsque ce mélange est réellement constitué dans ces proportions, il ne laisse aucun résidu après sa combustion.

Lorsqu'on veut rechercher la présence de l'hydrogène ou d'un autre gaz combustible dans un mélange gazeux contenant de l'oxygène (2), on ajoute d'abord un volume connu d'hydrogène, puis un volume quelconque du gaz de la pile et on fait passer l'étincelle (3). S'il y a de l'hydrogène dans le mélange, la diminution de volume doit être plus grande que trois fois le

(1) Le zinc pur est très peu attaqué par l'acide chlorhydrique pur. On détermine un dégagement abondant de gaz en ajoutant à l'acide chlorhydrique quelques gouttes d'une solution de chlorure d'or ou de chlorure de platine.

(2) En faisant passer l'étincelle dans ce mélange. une diminution de volume indique la présence de l'hydrogène; mais la combustion peut ne pas se produire si la proportion d'hydrogène est trop faible; d'autre part, s'il y a trop peu d'hydrogène, la combustion peut se produire, mais être incomplète. Elle devient complète si on ajoute une quantité suffisante de gaz de la pile.

(3) On peut aussi ajouter simplement au mélange du gaz de la pile en quantité suffisante pour que la détonation se produise. Si la diminution de volume est plus grande que le volume de gaz de la pile ajouté, c'est la preuve que le mélange gazeux contenait de l'oxygène et de l'hydrogène.

volume d'hydrogène ajouté; ce procédé indique aussi qu'il n'y a pas d'oxygène dans le mélange lorsque, après la détonation, le volume de gaz est égal au volume primitif augmenté du volume d'hydrogène ajouté.

On prépare facilement le gaz de la pile à l'aide de l'appareil de Bunsen. Il est plus avantageux d'employer l'appareil modifié par Gréhant (1), qui ne présente pas d'espace nuisible. Il vaut mieux, au lieu de décomposer de l'eau acidulée comme on le fait souvent, décomposer une solution de potasse qui ne donne pas d'ozone.

Le gaz ainsi obtenu ne laisse pas de résidu après la combustion, tandis qu'il y en a presque toujours avec le gaz obtenu par décomposition de l'eau acidulée par l'acide sulfurique.

. . . .

Il ne reste plus maintenant qu'à indiquer le meilleur procédé pour faire une analyse. — J'ai dit qu'il était préférable et aussi rapide de faire le dosage de l'oxygène par détonation; c'est donc ce procédé que je choisis de préférence.

Le mélange gazeux étant introduit dans la cloche eudiométrique à l'aide de l'appareil ci-contre (2), on fait arriver un peu d'eau, $0^{cc},15$ environ, dans le tube, cela dans le but de faire la première lecture sur un ménisque d'eau (3).

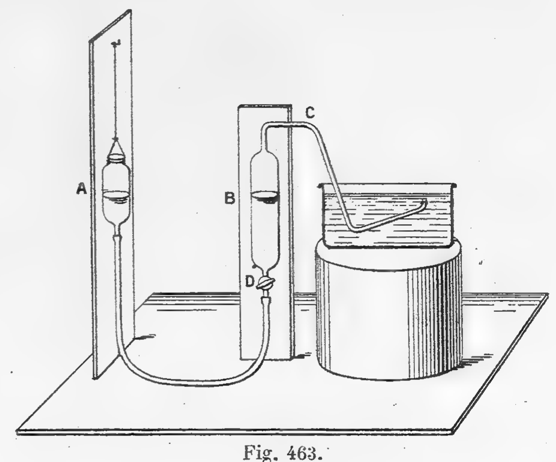


Fig. 463.

Cela fait, on vérifie la position du comparateur comme il a été dit plus haut, puis on fait affleurer le sommet du ménisque *de mercure* au plan passant par les deux crins du viseur, et on lit le volume (4) indiqué par l'intersection,

(1) Gréhant, *Les gaz du sang*, *loc. cit.*, p. 42.

(2) Le petit appareil figuré ici est de la plus grande commodité pour transvaser les gaz. Il se compose de deux réservoirs A et B reliés ensemble par un tube de caoutchouc. Au réservoir B est soudé un tube à calibre étroit C, qui se rend sur la cuve à mercure. Le robinet D sert à ouvrir ou à remplacer la communication entre A et B.

(3) Ce procédé présente l'avantage de permettre deux lectures analogues avant et après l'absorption de CO^2. Mais il présente l'inconvénient résultant de la dissolution d'une petite quantité de CO^2 dans l'eau. Si l'on préfère employer un autre procédé, on peut faire la première lecture à la surface du ménisque de mercure non recouvert d'eau, mais il faut alors ajouter $0^{cc},07$ au volume lu. On devra au contraire retrancher $0^{cc},7$ des volumes lus après absorption de l'acide carbonique et après l'absorption de l'oxygène, ou après la détonation.

(4) Ce volume n'est pas exact en valeur absolue, puisqu'on compte comme volume gazeux toute la portion d'eau comprise au-dessus d'un plan passant par la partie inférieure du ménisque. Pour des tubes mesurant 1 centimètre de diamètre intérieur, ce volume d'eau est sensiblement égal au tiers du volume compris entre les plans A et B (fig. 464), c'est-à-dire égal à $0^{cc},21 = 0^{cc},7$. Il faut donc ajouter $0^{cc},7$ à tous les volumes lus, pour avoir des chiffres à peu près exacts en valeur absolue. Une très petite quantité de gaz, surtout d'acide carbonique, se dissout dans l'eau. On en tient compte si l'on veut en se reportant aux tables de solubilité des gaz.

avec la paroi du tube, d'un plan passant par la base du ménisque d'eau.

Ce volume connu, on introduit dans le tube une certaine quantité de la solution de potasse, le moins possible. Cette quantité sera facilement évaluée, si l'on connaît approximativement le volume d'acide carbonique qui doit être contenu dans le gaz en expérience, et sachant aussi qu'un centimètre cube de la solution de potasse à 8 p. 100 peut absorber environ 30 centimètres cubes d'acide carbonique.

On agite verticalement le tube sur la cuve à mercure, en ayant soin de ne jamais saisir avec les doigts que la partie inférieure contenant du mercure, ou mieux encore en le tenant à l'aide d'une pince.

Au bout de deux minutes, on remet le tube en place, puis la cage de verre sur l'eudiomètre et l'on attend environ cinq minutes (plutôt plus que moins) avant de faire une nouvelle lecture, afin de laisser au gaz le temps de se mettre en équilibre de température avec l'air ambiant. La lecture se fait comme la précédente. La différence entre les deux lectures donne l'acide carbonique absorbé.

A l'aide de l'appareil figuré plus haut (fig. 463), on introduit dans le tube un volume d'hydrogène égal à un peu plus de deux fois la quantité d'oxygène supposée présente dans le gaz à analyser; puis on fait une nouvelle lecture du volume total sur l'eudiomètre, comme précédemment. Cela fait, on fait passer l'étincelle (1), puis, après quelques minutes d'attente, on fait une nouvelle lecture. Le volume de l'oxygène contenu dans le mélange gazeux est égal au tiers de la différence entre les deux dernières lectures.

Voici un exemple d'analyse d'un mélange gazeux contenant azote, acide carbonique et oxygène.

Volumes lus.	
Volume primitif..................	$12^{cc},45$
— après action de la potasse..	10,20
— après addition d'hydrogène.	15,35
— après explosion.	8,95

Volumes réels.

$\left.\begin{matrix}9,95\\8,16\end{matrix}\right\rangle CO^2 = 1^{cc},79$

$\left.\begin{matrix}12,28\\7,16\end{matrix}\right\rangle O^2 = \frac{5,12}{3} = 1^{cc},71$

$\text{Azote} = 9,95 - (1,79 + 1,71) = 6^{cc},45$

Insistons en terminant sur la nécessité :

1° De ne jamais toucher avec les doigts le tube eudiométrique ;

2° D'attendre quelques minutes avant de faire la lecture après chaque manipulation.

Fig. 464. — Tube avec ménisque d'eau et de mercure.

Lorsqu'on veut faire une analyse en absorbant l'oxygène par le pyrogallate de potasse, on n'a qu'à ajouter la solution d'acide pyrogallique après la deuxième lecture, c'est-à-dire après l'absorption de l'acide carbonique. On agite vigoureusement sur la cuve à mercure, et on fait la lecture lorsque le volume a cessé de diminuer. Comme le liquide qui surmonte le mercure est très coloré, on devra faire la lecture à la partie supérieure du ménisque de ce liquide, c'est-à-dire au plan A (fig. 464). On ajoutera au volume lu $0^{cc},21$, chiffre représentant le volume compris entre les plans A et B. A cause

(1) Il est bon pour cela de maintenir le tube à l'aide d'une autre pince que celle de l'eudiomètre, celle-ci pouvant à la longue être détériorée par le choc dû à l'explosion.

de la teinte noire du liquide, on aura aussi très souvent la plus grande difficulté à affleurer à un même plan horizontal les ménisques de mercure des deux tubes eudiométriques (1).

EUDIOMÈTRES DE PRÉCISION

Ce sont des instruments qui permettent de faire l'analyse des gaz avec une précision rigoureuse et néanmoins avec une assez grande rapidité.

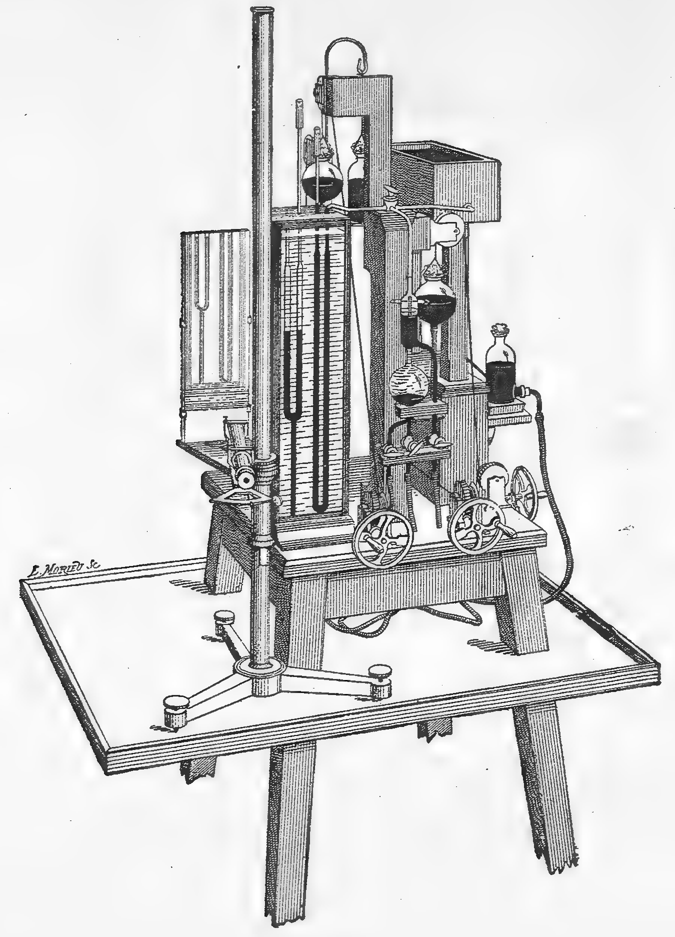


Fig. 465.

Les deux eudiomètres que je vais décrire sont ceux employés dans le laboratoire de M. Chauveau et qui ont été construits d'après ses indicationse

(1) En général, on compte comme négligeable l'erreur due à la pression de la colonne di liquide qui surmonte le ménisque de mercure au moment des lectures. Mais on peut en tenr,

le premier spécialement pour l'analyse des gaz du sang, le second pour l'analyse des gaz de la respiration.

EUDIOMÈTRES POUR L'ANALYSE DES GAZ DU SANG

Cet instrument, représenté ci-dessus (fig. 465), est composé essentiellement des parties suivantes :

1° *Un tube mesureur* destiné à effectuer les mesures sur le gaz en expérience ;

2° *Un laboratoire* dans lequel s'effectue l'absorption de l'acide carbonique et la combinaison de l'oxygène à l'hydrogène par l'étincelle électrique ;

3° *Un tube d'aspiration*, destiné à amener le gaz à analyser dans le *mesureur* ;

4° *Un robinet* à trois voies rectangulaires (en T) permettant de faire communiquer ensemble les trois parties précédentes;

5° *Un tube comparateur*, destiné à effectuer automatiquement les corrections de température et de pression;

6° *Une lunette* servant à faire les lectures de volume sur les tubes gradués.

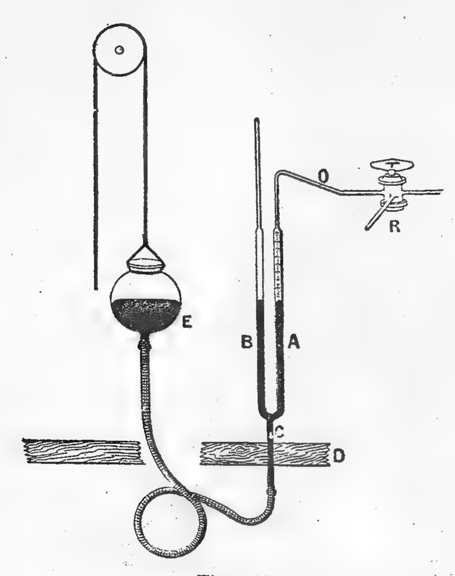


Fig. 466.

Mesureur. — C'est un tube en Y (fig. 466) dont une branche A est graduée et reliée au robinet à trois voies R. L'autre branche B s'ouvre librement à l'air. La partie C du tube est fixée sur la plaque D, puis reliée par un tube en caoutchouc au réservoir à mercure E, qui peut être élevé ou abaissé. Le calibre intérieur du tube est de 8 millimètres environ; dans la graduation, faite en demi-centimètres cubes, les plus petites divisions ont sensiblement entre elles un écartement de 1 millimètre, et représentent des vingtièmes de centimètre cube. Le 0 de la graduation correspond au trait de repère 0 (1).

Laboratoire. — Il est constitué par un réservoir A (fig. 467) en communication : d'une part avec le robinet B par le tube C; d'autre part par le

compte facilement; il n'y a qu'à évaluer la hauteur du liquide, à diviser cette hauteur par 13,7, densité du mercure, et à calculer, d'après la formule connue, le volume du gaz avec une pression de $760 - h$ (hauteur en mercure de la colonne du liquide), en supposant le gaz sec et à 0°, c'est-à-dire d'après la formule : $V_0 = V \frac{760 - h}{760}$.

(1) Le mesureur et le comparateur sont immergés dans une cuve à eau (Voy. fig. 465). Par ce moyen, on est sûr que les gaz contenus dans le mesureur et dans le comparateur sont à la même température.

tube E avec le réservoir D, rempli d'une solution de potasse; enfin en dernier lieu avec le réservoir mobile à mercure F, par le tube G. Le réservoir à potasse D porte à sa partie inférieure un tube bifurqué dont une branche H sert à l'introduction de la potasse, et dont l'autre I communique avec le réservoir à mercure K mobile sur le plan incliné L. Les robinets M, N, P,

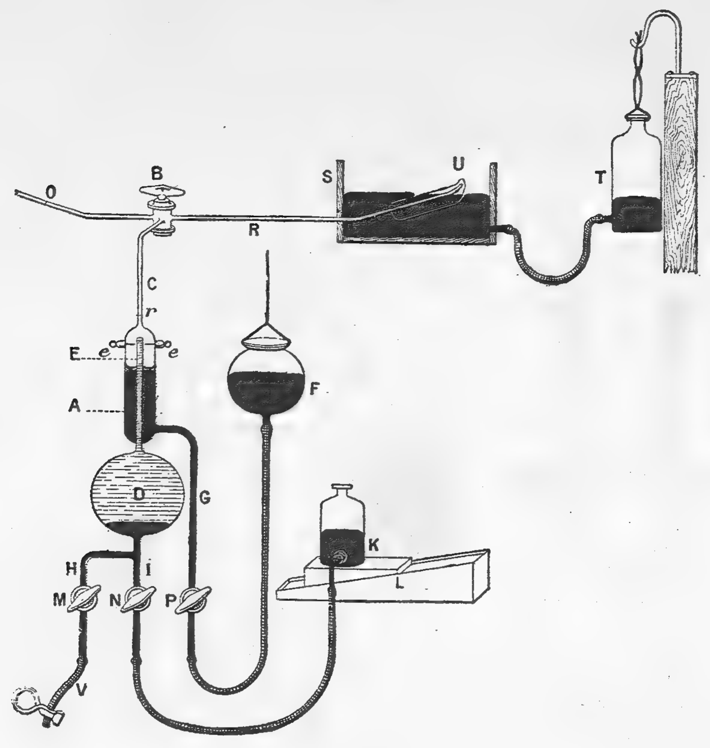


Fig. 467.

servent à établir ou à interrompre les communications avec les différents réservoirs.

Le tube C porte à sa partie inférieure un trait de repère *r*. Sur les côtés du réservoir A sont appliquées deux pièces métalliques *e*, *e*, en relation avec des fils de platine pénétrant dans l'intérieur du réservoir, et destinés à la production de l'étincelle qui fera détoner le mélange d'oxygène et d'hydrogène.

Tube d'aspiration. — Ce tube (R, fig. 467), en relation avec le robinet à trois voies B, se rend à la cuve à mercure S. Son extrémité libre amincie et recourbée permet l'extraction absolument complète du gaz contenu dans une cloche U de forme appropriée. La cuve à mercure S est en communication avec le réservoir T, qui peut être abaissé ou élevé, de manière à découvrir la pointe du tube aspirateur ou à l'immerger.

Comparateur. — C'est un tube en Y semblable à celui décrit précédemment

(*mesureur*), mais dont une des branches A est fermée, et dont l'autre B s'ouvre librement à l'air; ce tube a exactement le même calibre intérieur que le mesureur, et la branche A porte une graduation analogue à celle décrite pour ce dernier (fig. 468).

Dans la branche A, on a enfermé un volume d'azote pur tel que, si la pression atmosphérique était de 760 millimètres et la température 0°, le volume de ce gaz sec serait exactement de 5 centimètres cubes. Le volume occupé par cette masse gazeuse à un moment quelconque donne facilement la variation de volume subie par les 5 centimètres cubes d'azote à la température et la pression actuelles. Les volumes du mesureur et du comparateur étant mesurés à la même température et à la pression atmosphérique, le volume du gaz analysé sera ramené à 0° et 760 millimètres par un calcul très simple. Si par exemple le volume lu au comparateur est de $5^{cc},4$ et le volume lu au mesureur 12 centimètres cubes, on ramènera ce dernier à 0° et 760 millimètres en effectuant le calcul suivant :

$$\frac{5 \times 12}{5,4}.$$

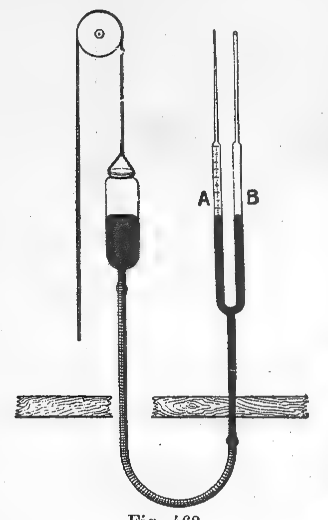


Fig. 468.

Fig. 469.

La correction de tension de la vapeur d'eau est faite en même temps que les corrections de température et de pression, les gaz contenus soit dans le comparateur, soit dans le mesureur, étant toujours saturés de vapeur d'eau. Dans le comparateur, on a introduit en même temps que l'azote une très petite quantité d'eau qui comble l'espace angulaire compris entre la paroi de verre et le ménisque de mercure (fig. 469). La même opération est faite à chaque analyse pour le mesureur.

Lunette. — C'est une lunette ordinaire portant un niveau N (fig. 470). Elle est supportée par deux pièces B et C appliquées sur la pièce D. Une vis E (fig. 471), fixée dans une pièce F qui permet de la manœuvrer, s'engage dans la pièce C sur laquelle elle se visse. La pièce D servant de point d'appui à la pièce F, on voit qu'en faisant tourner cette dernière on élèvera ou on abaissera C, et par suite l'extrémité H de la lunette, l'autre extrémité K restant à peu près immobile. En tournant, la vis entraîne avec elle la pièce I, mobile sur un arc A, divisé en 100 parties (en pratique, c'est la partie L′ qui, poussée par le doigt, fait mouvoir la vis E et déplace l'axe optique de la lunette dans un plan vertical). — Le tout est réglé de telle sorte que, le trait de repère tracé sur la partie L coïncidant avec le 0 de la graduation de l'arc, et l'axe optique passant par un trait de graduation A (fig. 472) du comparateur ou du mesureur, cet axe vient exactement passer par le trait de graduation suivant, C, lorsqu'on amène L′ de 0 à la division 100 (fig. 470). On comprend donc facilement que, le ménisque de mercure occupant la

position intermédiaire B (fig. 472), si la partie L′ (fig. 472) est déplacée de manière à amener l'axe optique de la lunette à passer par le sommet du

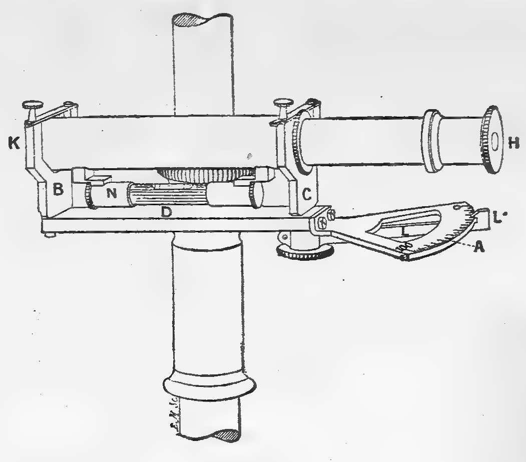


Fig. 470.

ménisque, le chemin parcouru sur l'arc divisé indiquera la distance AB en unités égales à $\frac{AC}{100}$ (fig. 472). Or, dans la graduation du mesureur et du comparateur, une division AC a la valeur de $\frac{1^{cc}}{20}$. Donc une division de l'arc a une valeur de $\frac{1^{cc}}{2000}$. Ainsi, les divisions de cet arc indiquent des demi-millièmes de centimètre cube.

L'axe optique de la lunette est donné par deux fils rectangulaires placés

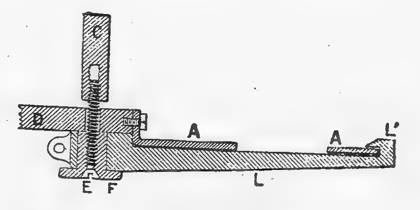


Fig. 471.

dans son intérieur, l'un horizontal, l'autre vertical ; voici maintenant la manière d'effectuer les lectures : la lunette, étant placée sur le côté gauche de l'eudiomètre (fig. 473), est dirigée vers un miroir E placé en arrière, et dans lequel se reflètent les images du comparateur et du mesureur. Les graduations de ces tubes sont placées du côté du miroir, sur la face F. La lunette est d'abord mise horizontale à l'aide des vis A et B, puis elle est déplacée verticalement, et l'axe optique amené le plus près possible du ménisque de mercure au niveau duquel on veut faire la lecture. Cela fait, en

tournant légèrement la vis C, on amène facilement l'axe optique à coïncider avec le trait de graduation convenable (A, fig. 472) ; puis, par la manœuvre indiquée plus haut, on recherche la valeur de AB.

En déplaçant la vis C, on modifie quelque peu l'horizontalité de la lunette, mais d'une quantité si faible qu'il est impossible d'en apprécier l'influence sur les lectures.

L'appareil nous étant connu, je vais décrire le manuel opératoire de l'ana-

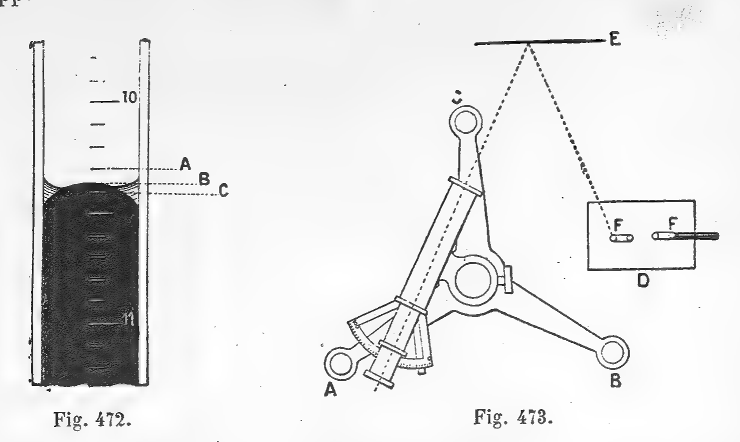


Fig. 472. Fig. 473.

lyse d'un mélange gazeux. Il faut, en premier lieu, mettre l'appareil en marche, ce qui consiste :

1° A remplir l'ampoule D d'une solution de potasse à 10 p. 100 (fig. 467) ;

2° A disposer une petite quantité de cette solution sur le mercure du réservoir A ;

3° A remplir d'un gaz inerte et à la pression atmosphérique l'espace compris entre le trait de repère *r* et le robinet B.

Ces opérations s'effectuent de la manière suivante : On ajuste un tube de verre sur le tube de caoutchouc V, puis on le relève verticalement (1) ; on fait communiquer le réservoir A avec l'extérieur par le robinet B, puis on verse de la potasse par le tube de verre après avoir ouvert le robinet M : lorsqu'on juge que l'ampoule D en contient une quantité suffisante, on verse du mercure dans le tube, de manière à en remplir la branche H, et éviter le contact prolongé de la potasse avec le robinet M. Cela fait, on ouvre N et on fait glisser le réservoir K le long du plan incliné L jusqu'à ce que quelque peu de potasse ait pénétré dans le réservoir A. Il ne reste plus : 1° qu'à obtenir dans ce dernier un mélange d'air et d'hydrogène en proportions convenables, et à le faire détoner ; 2° à élever le réservoir F jusqu'à ce que la potasse vienne affleurer au trait de repère *r*. Ces deux opérations sont décrites plus loin.

L'appareil est ainsi prêt à fonctionner ; les quatre robinets M, N, P, B, sont fermés. Le robinet B est dans la position 2 (fig. 474).

(1) On a au préalable fait arriver du mercure dans la branche I jusqu'au niveau de la bifurcation, puis on a fermé N et P,

Voici les opérations successives que l'on a à effectuer dans une analyse :

1° Transvasement du gaz à analyser dans le mesureur;

2° Première mesure de volume;

3° Transvasement du gaz du mesureur dansle laboratoire pour l'absorption de l'acide carbonique;

4° Transvasement du gaz du laboratoire dans le mesureur;

5° Deuxième mesure de volume;

6° Introduction dans le mesureur d'une certaine quantité d'hydrogène;

7° Mesure de ce volume d'hydrogène;

8° Passage de l'hydrogène dans le laboratoire;

9° Détonation;

10° Transvasement du résidu du laboratoire dans le mesureur ;

11° Mesure du résidu.

Toutes ces opérations peuvent être ramenées à trois. Il suffit de décrire les manœuvres 1, 3 et 4 pour connaître la manière d'effectuer une analyse.

A. *Introduction du gaz à analyser ou de l'hydrogène servant à l'analyse.* — Je ne ferai qu'indiquer sommairement les opérations consécutives à effectuer :

Immerger la pointe du tube aspirateur.

Élever le réservoir du mesureur jusqu'au niveau du sommet du tube, le robinet R étant dans la position 1 (fig. 474).

Fermer ce robinet (position 2, fig. 474) lorsque le mercure sort par la pointe du tube aspirateur.

Placer sur ce dernier une cloche contenant le gaz à analyser, comme le montre la figure 467, puis découvrir la pointe du tube aspirateur en abaissant T.

Mettre le robinet B dans la position 1 et abaisser progressivement le réservoir du mesureur jusqu'à ce qu'on ait la quantité voulue de gaz ou la totalité du contenu de la cloche.

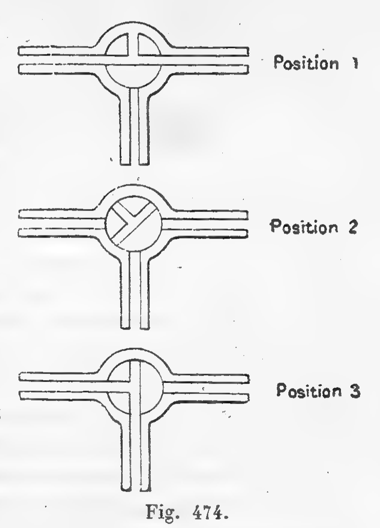


Fig. 474.

Laisser pénétrer, à la suite du gaz, le mercure dans le tube aspirateur jusqu'au robinet et fermer celui-ci (position 2).

Ouvrir doucement le robinet et manœuvrer en même temps le réservoir du mesureur de manière à faire arriver le mercure au trait de repère correspondant au 0 de la graduation du mesureur.

L'affleurement étant établi, mettre le robinet en position 2.

Mettre le gaz à la pression atmosphérique en manœuvrant le réservoir du mesureur et déterminant l'affleurement exact des sommets des deux ménisques, au fil horizontal de la lunette.

Lire le volume. Lire, immédiatement après, le volume du comparateur en ayant soin de répéter auparavant la manœuvre précédente.

B. *Transvasement du gaz du mesureur dans le laboratoire.* — Élever le réservoir du mesureur pour mettre le gaz en pression assez forte.

Ouvrir le robinet B (position 1) et le fermer (position 2) au moment où le mercure a rétrogradé jusque vers lui.

Mettre le robinet B dans la position 3.

Ouvrir le robinet P (fig. 467). Le gaz pénètre dans le laboratoire et le mercure s'abaisse dans celui-ci. On élève alors progressivement le réservoir du mesureur jusqu'à ce que le mercure arrive à la partie supérieure du tube.

Si l'on cherche à absorber l'acide carbonique, il faut déterminer la rentrée du gaz dans le mesureur, puis le chasser à nouveau dans le laboratoire. Cette manœuvre, répétée plusieurs fois, a pour but de bien mélanger le gaz contenu dans les tubes de communication, avec celui du laboratoire, et de déterminer ainsi une absorption complète de l'acide carbonique.

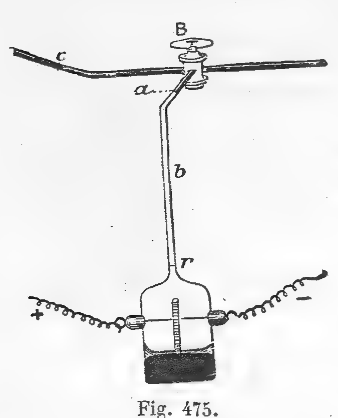


Fig. 475.

Si c'est l'hydrogène qu'on transvase dans le laboratoire, on le refoulera complètement dans celui-ci, et on fera arriver le mercure jusqu'en *a* (fig. 475), à une petite distance du coude formé par le tube *b*.

On met ensuite le robinet B (fig. 467) en position 2; avant de faire passer l'étincelle, il faut ouvrir le robinet P et, par l'intermédiaire du réservoir F, mettre en dépression de quelques centimètres de mercure le gaz du laboratoire.

C. *Transvasement du gaz du laboratoire dans le mesureur.* — L'absorption de l'acide carbonique ou l'explosion ayant eu lieu, on abaisse le réservoir du mesureur, et on élève celui du laboratoire (F, fig. 467. Le robinet P reste ouvert).

On met le robinet B en position 3. Le gaz passe dans le mesureur. On abaisse, rapidement d'abord, puis lentement, le réservoir de celui-ci jusqu'à ce que la potasse vienne affleurer au trait de repère *r* (fig. 467); à ce moment, on ferme le robinet P; le robinet B restant ouvert, on amène le gaz à la pression atmosphérique dans le mesureur, puis on amène le robinet B à la position 2 d'abord, puis à la position 1, pour laisser pénétrer le mercure jusqu'au trait de repère 0, et enfin à la position définitive 2. On rétablit la pression atmosphérique dans le mesureur et on fait la lecture.

D. *Opérations complémentaires, après chaque analyse effectuée et avant chaque analyse à effectuer.* — Après chaque analyse, il faut procéder au renouvellement de la potasse.

L'analyse étant terminée, et l'appareil étant dans le même état qu'à la fin de la série d'opérations C, on abaisse le réservoir F.

On ouvre les robinets N et P (fig. 467). La potasse de l'ampoule D arrive dans le laboratoire et le remplit, en se mélangeant à celle de l'analyse précédente. Quand elle arrive au bas du réservoir A, on élève F, la potasse

rentre dans l'ampoule D; quand le mercure arrive au niveau de la pointe du tube intérieur du laboratoire, on ferme P.

Si l'on juge qu'il reste encore trop de potasse, on fait arriver doucement le gaz du mesureur (résidu de l'analyse précédente) dans le laboratoire, en laissant fermé le robinet P, et N ouvert. Une nouvelle quantité de potasse rentre dans l'ampoule D. On ferme N quand on juge convenable la quantité de potasse restante.

Après chaque analyse, et ces dernières opérations étant terminées, il faut ramener l'affleurement de la potasse au trait *r* (fig. 467), si l'analyse suivante doit être faite de suite.

S'il doit s'écouler un temps plus long jusqu'à la prochaine analyse, le résidu est partagé entre le mesureur et le laboratoire, et mis à la pression atmosphérique.

Indications complémentaires. — Il est nécessaire d'employer une solution de potasse dont la concentration ne dépasse pas la proportion de 7 à 8 p. 100, afin d'avoir une solution qui sature le gaz d'humidité.

Pour contenir les gaz à analyser, il est bon d'employer des cloches analogues à celle de la figure 467; leur extrémité recourbée et amincie permet facilement, par une adaptation parfaite sur l'extrémité du tube aspirateur, d'extraire la totalité de leur contenu.

Il est nécessaire de déterminer, par plusieurs analyses de l'air, la valeur de l'hydrogène employé, et de s'assurer qu'il est parfaitement pur.

EUDIOMÈTRE POUR L'ANALYSE DE L'AIR ET DES GAZ DE LA RESPIRATION

Cet eudiomètre est basé sur les mêmes principes que le précédent. Il permet de faire l'analyse sur 100 à 110 centimètres cubes d'air. Il diffère de l'eudiomètre précédent par quelques particularités que je vais énumérer (fig. 476).

Le comparateur A renferme 100 centimètres cubes d'hydrogène pur mesurés à 0° et 760 millimètres et à l'état sec. Il est relié au réservoir à mercure F, mobile le long de la tige G au moyen de la vis H. Cette vis, fixée à la partie supérieure, pénètre dans un écrou fixé au réservoir F et peut ainsi faire monter ou descendre ce dernier. Les déplacements en hauteur de ce réservoir sont ainsi très petits pour un tour de la vis H, ce qui est très avantageux dans l'emploi du comparateur.

Le mesureur B présente deux ampoules C, D reliées par un tube gradué E de 4 centimètres de long environ. L'ampoule C est destinée à la mesure de l'hydrogène; elle a une capacité de 58 centimètres cubes; la graduation du tube E s'étendant de 58 à 61 centimètres cubes, on prend toujours pour les analyses un volume d'hydrogène compris entre ces deux chiffres. La seconde ampoule D est destinée à diminuer la longueur de la portion graduée B. Cette portion est graduée de 90 à 110 centimètres cubes. Cette graduation et le volume des ampoules sont calculés de telle manière qu'avec un volume de 58 à 61 centimètres cubes d'hydrogène et un volume d'air (atmosphérique ou expiré) compris entre 90 et 110 centimètres cubes, l'explosion se

produise toujours, et que le résidu ait un volume compris aussi entre 90 et 110 centimètres cubes.

Le robinet I est à deux voies rectangulaires; K est le laboratoire et L le réservoir à potasse. K est en relation avec le réservoir à mercure M, et L avec N.

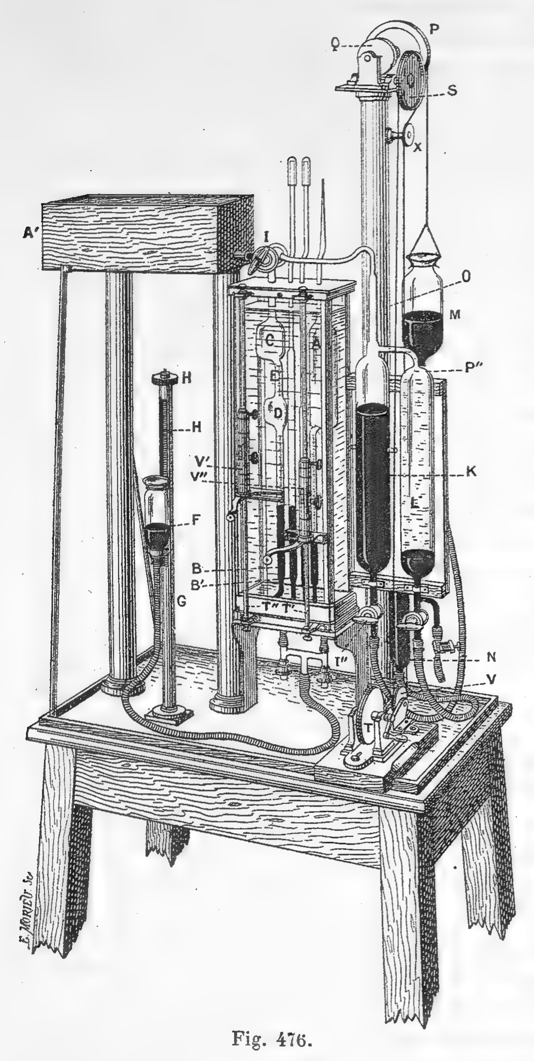


Fig. 476.

Le laboratoire K est relié au mesureur par le tube P' capillaire seulement de I en O. Il est trop large de O en P'' pour que le mercure puisse s'y maintenir lorsqu'on l'amène jusque vers le laboratoire. Cette disposition est prise en cas de maladresse ou d'inattention de l'opérateur, et pour éviter d'avoir à faire rentrer dans le mesureur du mercure qui aurait été en contact avec la potasse.

Le mercure s'écoule toujours librement dans le laboratoire à partir de O, et sans former d'index.

Le réservoir à potasse L a une capacité de 300 centimètres cubes. Il communique avec le réservoir à mercure N qui permet de renouveler à volonté la petite quantité de potasse du laboratoire.

Le mesureur est en communication avec le réservoir A (fig. 477). Les deux réservoirs A et M sont mis en mouvement par la poulie P, et marchent en sens inverse; tandis que le réservoir A établit une compression dans le mesureur, le réservoir M établit une dépression dans le laboratoire. Cette disposition rend plus rapide le transvasement des gaz entre B et K. Lorsqu'on veut se servir isolément de l'un des réservoirs, A ou M, il n'y a qu'à interrompre la communication entre B et K au moyen de la clef I.

Sur l'axe de la poulie P est fixée une roue dentée Q, mise en mouvement par une vis sans fin R portée par l'axe de la poulie S. Cette dernière est reliée au système des poulies T, U, V, X par la corde Y. — U, V, X, sont des

poulies de renvoi destinées à empêcher le contact de la corde Y avec l'instrument. T est une poulie munie d'une manette Z, et qui sert à la manœuvre de tout le système.

En face de chacun des tubes *comparateur* et *mesureur* se trouve un viseur V', V'', mobile le long d'une tige verticale T', T''. Ces viseurs permettent de faire les lectures avec moins de $0^{cc},005$ d'erreur, et avec une grande rapidité ; ce qui les rend plus avantageux que les lunettes.

Chaque viseur se compose d'un tube A (fig. 478) glissant sur le tube D sur lequel il peut être fixé au moyen de la vis C. Sur ce tube A est fixé un vernier au vingtième E. Un second tube B glisse sur A et porte une fenêtre F qui donne passage au vernier. La partie inférieure du tube B porte une lame métallique H dont deux bords J, K repliés en forme de cadre portent un cheveu M (1). La lame métallique H est prolongée en avant par une autre lame N portant à son extrémité un petit cercle métallique vertical O, au centre duquel est percé un œilleton P, placé exactement à la hauteur du cheveu M.

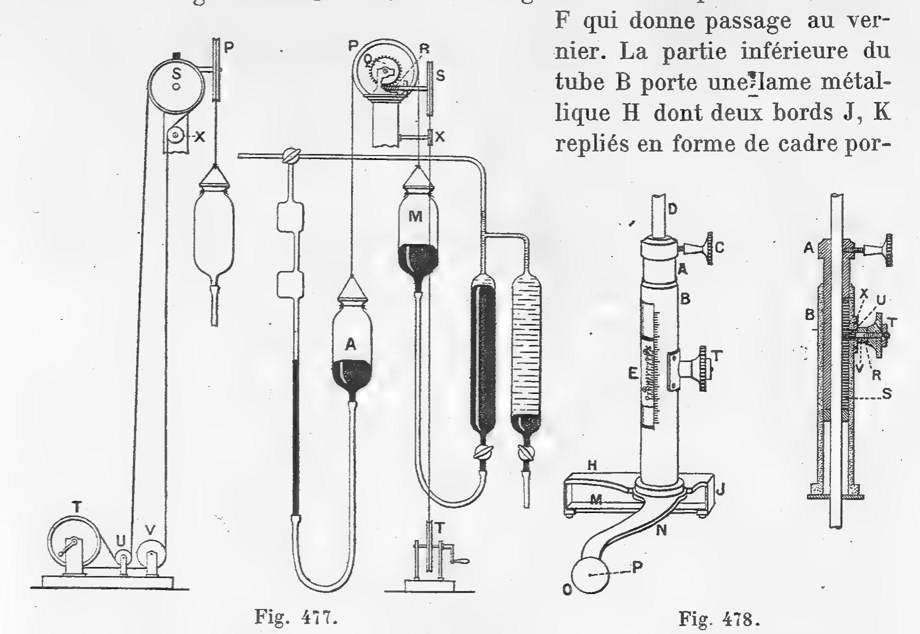


Fig. 477. Fig. 478.

Le tube B se meut sur le tube A au moyen du mécanisme suivant : dans le tube A a été percée une fenêtre L, dont un des bords S a été transformé en crémaillère. Sur cette dernière se meut, au moyen d'un bouton T, un pignon denté U, relié à la vis T par l'axe R. Cet axe est mobile dans la pièce V fixée au tube B.

Ainsi donc, d'après cette description, en tournant le bouton T, le tube B,

(1) Le plan déterminé par ce cheveu et l'œilleton est rendu horizontal en le faisant coïncider : 1° avec une ligne horizontale passant par le sommet des deux ménisques de mercure du mesureur ou du comparateur, lorsque le gaz de ceux-ci est en communication avec l'atmosphère ; 2° avec une ligne horizontale, perpendiculaire au cheveu et déterminée par un niveau d'eau (tube en U à très longues branches) placé dans la cuve de l'eudiomètre.

avec toutes les pièces qu'il porte, se déplacera vers le bas si le tube A a été fixé sur D par la vis C.

La tige D qui supporte les viseurs peut être rendue verticale (ou la lame H rendue horizontale) par le système suivant : elle glisse à sa partie inférieure et à sa partie supérieure (fig. 479) dans deux manchons A, B qui sont fixés

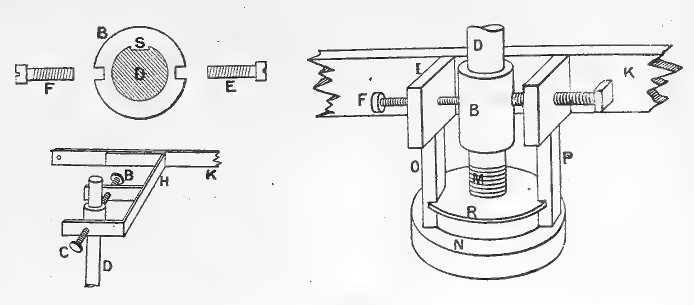


Fig. 479.

en haut par deux vis C, D, situées dans un plan antéro-postérieur, et en bas par deux vis E, F situées dans un plan latéral. Les pièces H et I qui soutiennent tout le système sont vissées à deux lames de cuivre K, K qui elles-mêmes s'appliquent contre la cuve de l'eudiomètre.

A sa partie inférieure, la tige D porte un pas de vis M correspondant à un pas semblable dans l'écrou N ; cet écrou étant maintenu toujours à la même hauteur par le filet R qui s'engage dans une rainure correspondante des pièces O, P, l'axe D s'élèvera ou s'abaissera lorsqu'avec la main on fera tourner N. Pour éviter que D tourne avec N, le manchon B porte un filet longitudinal S qui s'engage dans une rainure correspondante de l'axe D.

On conçoit facilement comment on peut rendre vertical l'axe D à l'aide des vis C, D, E, F. Voici maintenant comment on fait les lectures : Le 0 du vernier est mis en coïncidence avec le 0 de la graduation correspondante du tube B (fig. 478). Puis on amène le cheveu M dans le voisinage du ménisque de mercure, et on fixe le viseur en cet endroit au moyen de la vis C. Au moyen de l'écrou N (fig. 479), on fait coïncider exactement ce cheveu avec le trait de graduation du tube (mesureur ou comparateur) qui surmonte le ménisque. A l'aide de la vis T (fig. 478), on amène le cheveu à être tangent au ménisque, et on lit alors quelle est la division du vernier qui coïncide avec une division de la graduation du tube B.

On emploie deux viseurs, un pour le mesureur et un pour le comparateur. Celui du comparateur est toujours en position convenable pour faire la lecture, et il n'y a que la mesure au vernier à effectuer. C'est une condition qui augmente la rapidité des analyses.

Quant à la manœuvre pour l'analyse d'un mélange gazeux, elle est sensiblement la même qu'avec l'eudiomètre précédent.

La cloche contenant le mélange à analyser est placée sur la cuve à mercure A', de manière à coiffer le tube d'aspiration de l'eudiomètre. Lorsqu'on a pris une quantité suffisante de gaz (de 100 à 104 centimètres cubes environ),

on aspire à sa suite du mercure dans le tube, jusqu'à ce qu'il s'en écoule dans le mesureur. A ce moment, on ferme la clef I. Cette précaution a pour but de remplir de mercure les deux voies de la clef, et de n'y conserver aucune bulle d'air qui dans la suite est une cause d'erreur dans les mesures. La graduation commence du reste à partir de la clef, sans qu'il soit tenu aucun compte des deux voies de cette dernière (1). Le gaz étant enfermé dans le mesureur, l'analyse consistera donc dans les opérations suivantes (2) :

1° Première mesure du volume du mélange gazeux V;

2° Introduction du mélange dans le laboratoire pour l'absorption de l'acide carbonique, puis rentrée du gaz dans le mesureur (3);

3° Deuxième lecture du volume du mélange gazeux V′ et introduction nouvelle dans le laboratoire ; on amène le mercure jusqu'en P′ ;

4° Aspiration dans l'ampoule C de 59 centimètres cubes d'hydrogène environ et mesure exacte de ce volume H;

5° Introduction de l'hydrogène dans le laboratoire et mélange avec le gaz à analyser, au moyen d'une nouvelle introduction dans le mesureur suivie immédiatement du refoulement de la masse dans le laboratoire (4). On amène le mercure en P′, et on fait passer l'étincelle;

6° Introduction du résidu dans le mesureur et mesure du volume V″.

$$\text{Résultats :} \left\{ \begin{array}{l} CO^2 = V - V' \\ O^2 = \dfrac{(V' + H) - V''}{3} \end{array} \right.$$

Il faut avoir soin, avant toute lecture dans le mesureur, de faire écouler du mercure dans ce dernier, afin d'y chasser le gaz contenu dans les deux voies de la clef I.

Comme dans l'eudiomètre précédent, au moment de chaque lecture, la potasse affleure au trait de repère O, et la portion de gaz comprise entre O et I a été mise en équilibre de pression avec l'atmosphère. Cette portion de gaz étant très faible, les variations dues au changement de la pression atmosphérique sont insensibles et inappréciables ; elles ne peuvent influer

(1) Cette disposition supprime les tâtonnements résultant de la difficulté de faire affleurer exactement le mercure au trait de repère O, commençant la graduation comme dans l'eudiomètre précédent. Ici, l'affleurement se fait exactement et automatiquement au bord de la clef du robinet en laissant écouler du mercure dans le mesureur, puis fermant la clef.

(2) Je ne puis entrer dans le détail de la manœuvre pour chaque opération, ce qui serait trop long. L'opérateur s'en tirera du reste avec facilité en sachant que les opérations s'effectuent par la manœuvre des deux clefs I et I″, et de la poulie T.

(3) En chassant le gaz dans le laboratoire, on a soin de ne jamais amener le mercure plus loin que le point P dans le tube de communication. Il faudra chasser alternativement le gaz (une, deux ou trois fois suivant sa richesse en CO^2) du laboratoire dans le mesureur et réciproquement, afin de mélanger à la masse du gaz privée de CO^2 la portion comprise de P′ en P″, et dont l'acide carbonique s'absorbe plus lentement.

(4) Si l'on n'a pas soin de faire cette manœuvre, il reste, de P′ en P″, d'abord de l'hydrogène pur, puis, plus bas, un mélange d'hydrogène avec le gaz à analyser, en proportions diverses suivant les couches considérées. Il y a par suite un point du tube où la combustion cesse de se propager et une certaine portion d'oxygène qui ne s'est pas combinée à l'hydrogène, d'où erreur.

que sur la quatrième décimale pendant le cours d'une analyse et même de plusieurs analyses.

A chaque lecture du mesureur, on doit faire une lecture au comparateur après y avoir établi la pression atmosphérique. Le calcul pour la correction de pression et température s'effectue comme il a été déjà dit (p. 712) à propos de l'eudiomètre précédent.

EUDIOMÈTRE DE PRÉCISION PERMETTANT L'ANALYSE A VOLONTÉ PAR LE PHOSPHORE OU LA DÉTONATION

Cet eudiomètre est absolument semblable au précédent, à part la modification figurée ci-contre (fig. 480). Un robinet à trois voies A permet d'envoyer

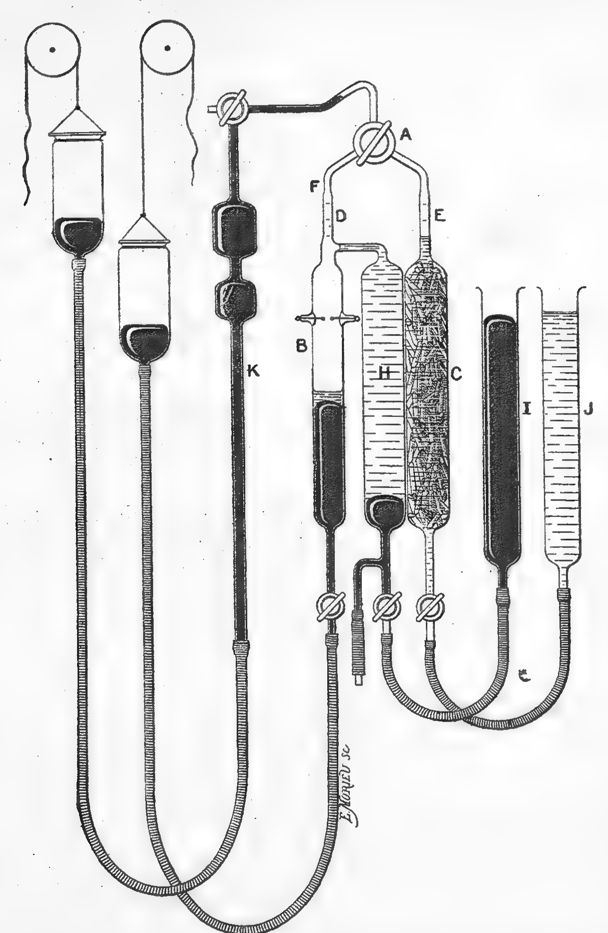


Fig. 480. — H, réservoir contenant la réserve de potasse ; I, réservoir à mercure en relation avec le précédent ; J, réservoir fixe à eau en relation avec le réservoir à phosphore ; K, mesureur.

le gaz à analyser soit dans le réservoir B contenant de la potasse, soit dans le réservoir C, contenant du phosphore. Après l'absorption de l'oxygène par

le phosphore, le gaz est renvoyé dans le réservoir à potasse, pour absorber les vapeurs d'acide phosphoreux, avant d'être réintroduit dans le mesureur. L'affleurement de la potasse du réservoir D ou de l'eau du réservoir à phosphore se fait au niveau de deux traits de repère D, E, et les portions de gaz AD, AE sont mises à la pression atmosphérique, comme il a été indiqué pour l'eudiomètre précédent. L'eudiomètre est construit de telle sorte que le mercure ne puisse pas former d'index jusqu'au point F dans des tubes capillaires. On a la précaution de ne jamais faire pénétrer de mercure dans le réservoir à phosphore, ce qui est facile en se servant du réservoir B comme intermédiaire. Il est inutile d'insister davantage pour comprendre le fonctionnement de l'appareil; l'examen du schéma en donne immédiatement la clef. On voit que si l'on met le réservoir B en communication permanente avec le mesureur par le robinet A, l'eudiomètre fonctionne exactement comme le précédent pour faire une analyse par détonation.

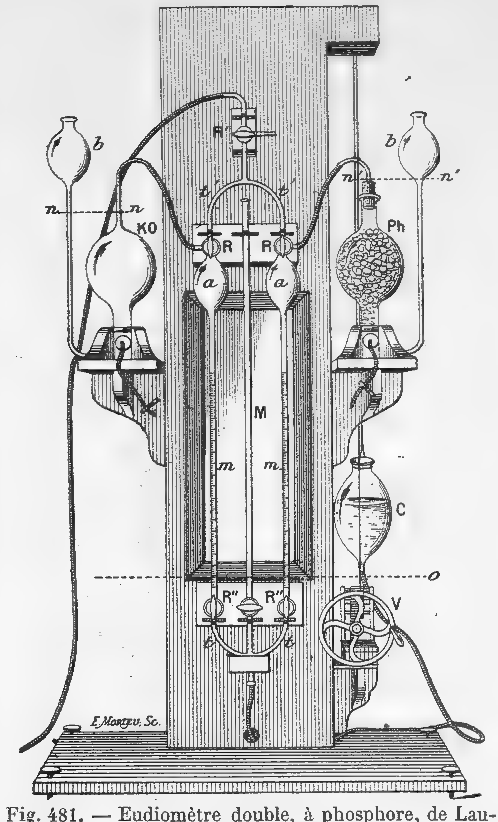


Fig. 481. — Eudiomètre double, à phosphore, de Laulanié; *mm*, tubes mesureurs d'une contenance de 100 centimètres cubes; R, robinets à trois voies établissant les communications nécessaires des tubes mesureurs; C, cuvette actionnée par la vis tangente V et permettant l'appel ou l'expulsion des gaz; R, robinet à trois voies établissant la communication des mesureurs avec le dehors ou avec le réservoir contenant le mélange gazeux à analyser; KO, laboratoire à potasse pour fixer le CO^2; *Ph*, laboratoire à phosphore pour fixer l'oxygène; M, manomètre pour ramener les gaz à la pression atmosphérique.

Eudiomètre double à phosphore de Laulanié. — Cet eudiomètre, figuré ci-contre, permet de faire avec une grande rapidité (10 minutes) des analyses précises; la légende de la figure me dispense de faire la description de cet appareil qui, par sa rapidité et sa précision, rend les plus grands services dans un laboratoire de physiologie. Dans des analyses faites par le même opérateur, d'une manière identique, il donne des résultats d'une fixité remarquable (1).

(1) Les eudiomètres à phosphore ne peuvent servir qu'à l'analyse de mélanges gazeux contenant moins de 40 p. 100 d'oxygène. Le phosphore absorbe en effet très mal l'oxygène lorsque ce gaz est à une tension supérieure à 40 p. 100 et il n'est pas ou très peu attaqué par l'oxygène pur. Il ne convient donc pas à l'analyse des gaz extraits du sang.

GAZ DU SANG

Par J. TISSOT.

Extraction des gaz du sang. — Procédé ordinaire. — Méthode et pompe double à mercure de Chauveau. — Tension des gaz dans le sang. — Aérotonomètre.

Le sang contient des gaz sous deux états différents : à l'état de dissolution et à l'état de combinaison. Ces gaz sont de l'oxygène, de l'acide carbonique, de l'azote, et des traces, en général, d'hydrogène sulfuré et de carbure d'hydrogène (ces deux derniers provenant de la résorption des gaz intestinaux).

L'azote existe en dissolution dans le plasma. L'oxygène est presque en totalité combiné à l'hémoglobine ; cependant, une faible partie est dissoute dans le plasma : une portion de l'oxygène est fixée à l'hémoglobine à l'état de combinaison instable, facile à détruire ; cette portion peut être obtenue facilement par le chauffage ou le déplacement par un autre gaz ; mais une autre portion plus solidement unie à l'hémoglobine forme avec elle une combinaison qui résiste beaucoup plus énergiquement aux procédés de dissociation ; la dissociation de cette combinaison ne peut être obtenue d'une manière complète que par l'action simultanée de la chaleur et du vide ; c'est pourquoi les seules méthodes exactes pour l'extraction des gaz du sang sont celles qui emploient à la fois ces deux éléments de dissociation.

L'acide carbonique du sang existe à la fois dans le plasma et dans les globules, à l'état de combinaison avec la potasse et la soude, et probablement aussi avec différentes substances albuminoïdes.

100 centimètres cubes de sang contiennent en moyenne 60 centimètres cubes de gaz.

A l'état de repos, chez le chien.	O^2.	CO^2.	Az.
100^{cc} de sang artériel contiennent.......	$20\text{-}24^{cc}$	39^{cc}	$1^{cc},5$
100^{cc} — veineux —	$8\text{-}12^{cc}$	46^{cc}	$1^{cc},5$

La composition des gaz du sang varie suivant que l'animal est en état de jeûne, de digestion, de repos ou de travail.

Aussi ces conditions doivent-elles toujours être rigoureusement déterminées dans toute extraction et analyse des gaz du sang.

Différentes méthodes ont été employées pour l'extraction des gaz du sang ; je les passerai sous silence pour ne parler que de l'extraction par l'action combinée de la chaleur et du vide, seule méthode qui donne des résultats exacts.

Je décrirai d'abord la méthode d'extraction par la pompe à mercure ordinaire, puis la méthode d'extraction par la pompe de Chauveau.

Méthode ordinaire modifiée. — Je donne ici quelques modifications importantes à cette méthode, modifications destinées à y introduire un peu plus d'exactitude. Je décrirai successivement :

1° La manière d'effectuer convenablement une prise de sang;

2° Les seringues pour une prise de sang;

3° Le dispositif pour l'extraction des gaz.

Prise du sang. — En général, dans toute expérience sur les gaz du sang, on se propose de comparer la teneur en gaz de deux sangs d'origine différente.

Le sang doit être extrait du vaisseau (comme il est indiqué plus loin à propos de la méthode de M. Chauveau), sans que la circulation y soit interrompue. On doit rejeter le procédé qui consiste à lier une canule sur le vaisseau.

Le sang est extrait à l'aide d'une canule piquante fine, adaptée à la seringue et plongeant dans le vaisseau. Par ce moyen, la circulation du sang n'est nullement gênée. La ponction du vaisseau se fait au moment même de la prise, de sorte qu'il n'y a pas stagnation du sang dans le bout central du vaisseau (ce qui se produirait avec une canule liée sur le vaisseau).

Les deux sangs que l'on veut comparer doivent être extraits *simultanément*, et avec la même vitesse.

Seringue pour l'extraction du sang. — La seringue que je décris ici est très commode parce qu'elle tient le vide sans difficulté, et qu'elle permet d'extraire avec une grande exactitude un volume de sang déterminé à l'avance, sans avoir à faire de lecture sur la seringue au moment de l'extraction.

Cette seringue est très longue (fig. 482). Le corps de pompe, d'une capacité de 45 centimètres cubes, a un diamètre intérieur de 15 millimètres; il porte à ses deux extrémités deux armatures en fer lutées, dont l'une A est munie latéralement d'un tube C également en fer et par lequel on aspire ou l'on refoule les liquides. Cette disposition permet, comme on le verra plus loin, d'expulser en totalité le mélange de sang et de sulfate de soude contenu dans la seringue.

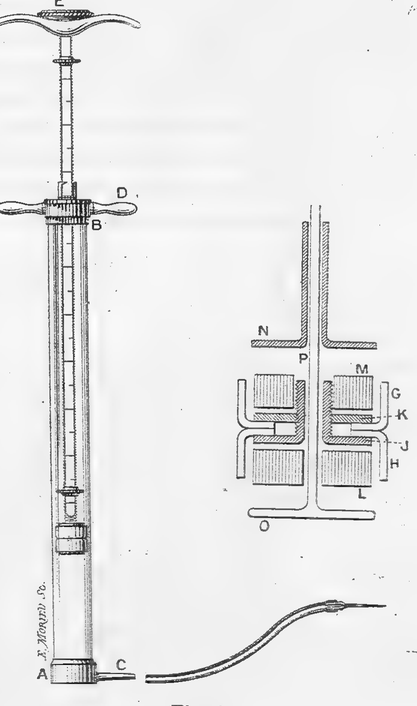


Fig. 482.

L'autre armature B porte un pas de vis sur lequel se fixe la pièce D formant couvercle et donnant passage à la tige du piston.

Le piston est construit de telle manière qu'il s'adapte toujours exactement sur les parois du tube de la seringue, malgré que celui-ci soit mal calibré. Il se compose de deux capuchons ou parachutes de cuir G, H, fixés entre les rondelles métalliques K, J, se serrant à vis l'une sur l'autre. Deux rondelles de caoutchouc M L sont placées à l'intérieur des capuchons de cuir et peuvent être comprimées entre les deux lames métalliques N et O. Ces deux lames peuvent être rapprochées l'une de l'autre au moyen d'un bouton à vis E placé à l'extrémité de la tige centrale P du piston et à l'extérieur, comme dans les pistons ordinaires à serrage. Toutes les pièces du piston sont naturellement percées d'un orifice central pour le passage de la tige P du système de serrage (1).

La pièce D est munie d'un index permettant de lire exactement la graduation de la tige du piston (2).

Sur le tube C de la seringue s'adapte un tube de caoutchouc à calibre étroit portant à son extrémité une canule à aiguille (fig. 482).

Pour préparer la seringue, le piston étant serré, on commence à y introduire environ 2 centimètres cubes de mercure, puis on chasse tout l'air que la seringue peut contenir ; cela fait, on aspire 14 centimètres cubes d'une solution saturée de sulfate de soude, et privée d'air par l'ébullition. Cette solution est renfermée dans un ballon bien bouché muni de deux tubes qui se rendent sur le mercure. On introduit le tube C de la seringue dans l'un d'eux et on aspire le liquide ; à mesure que ce dernier quitte le ballon par l'un des tubes, il est remplacé par un égal volume de mercure qui provient de la cuve ; de la sorte, le ballon reste constamment rempli de liquide, et ce dernier n'est

(1) Nous avons adopté ce système parce qu'il est d'un entretien beaucoup plus facile que celui des pistons de cuir et aussi parce que les pistons à serrage sont rendus plus facilement hermétiques que ceux de cuir.

(2) Du reste, la graduation du tube importe peu, car on prend toujours un volume parfaitement connu de sang, avec une erreur de $0^{mc},01$ et même avec une erreur moindre, à l'aide du système suivant : la tige du piston porte deux curseurs placés, l'un à l'intérieur de la seringue, l'autre en dehors ; le curseur intérieur est placé de telle manière que le piston étant tiré jusqu'à ce que ce curseur vienne s'appliquer contre le fond de la pièce D, l'index correspond à ce moment à une division déterminée de la tige du piston, soit 13.

Le curseur extérieur est de même placé à une position telle que, lorsqu'il bute contre D, l'index corresponde à la division 38 de la tige du piston.

Si donc les curseurs sont fixés d'avance à leurs positions respectives, et qu'on ait déterminé par plusieurs mesures le volume de liquide pris dans la seringue ou rejeté au dehors lorsqu'on fait mouvoir le piston entre les positions extrêmes limitées par les curseurs (mesure qui se fait facilement à 1 millimètre cube près), on sera certain dans une expérience de mesurer le sang avec la même exactitude. On aura cependant une erreur due à la dilatation du sang qui est à une température supérieure à la température extérieure. Mais on peut cependant réduire cette erreur et la rendre assez faible en enveloppant le corps de pompe de la seringue d'un linge mouillé et froid au moment où on prend le sang. Dans ces conditions, le sang se met assez vite et à peu près à la température ambiante.

On aura intérêt à prolonger pendant deux ou trois minutes le contact de la seringue avec le linge mouillé. On peut aussi, ce qui vaut encore mieux, aspirer le sang en tenant la seringue immergée dans de l'eau à la température ambiante.

Dans le cas d'un mélange de 25 centimètres cubes de sang et de 13 d'une solution saturée de sulfate de soude, l'erreur, pour un écart de température de 5° avec la température ambiante (ou entre deux mesures successives) serait de $0^{cc},064$.

jamais en contact avec l'air, condition essentielle pour qu'il soit totalement privé de gaz.

Lorsque la seringue contient 14 centimètres cubes de sulfate de soude, on la tient horizontalement, le tube C dirigé en haut, et on pousse doucement le piston jusqu'à ce que l'index de la seringue coïncide avec le trait 15 de la graduation de la tige du piston. Cela fait, on coiffe avec le tube B l'extrémité du tube C, et on continue à pousser très lentement le piston de la seringue, en tenant le tube B vertical et dirigé en haut jusqu'à ce que le liquide apparaisse à la pointe de l'aiguille, sans toutefois en perdre une seule goutte.

Je suppose que l'on a calculé au préalable la position du curseur intérieur, de façon à extraire un volume de sang connu d'avance.

Deux seringues sont préparées de cette manière.

Dispositif pour l'extraction des gaz. — Le procédé que je décris ici ne

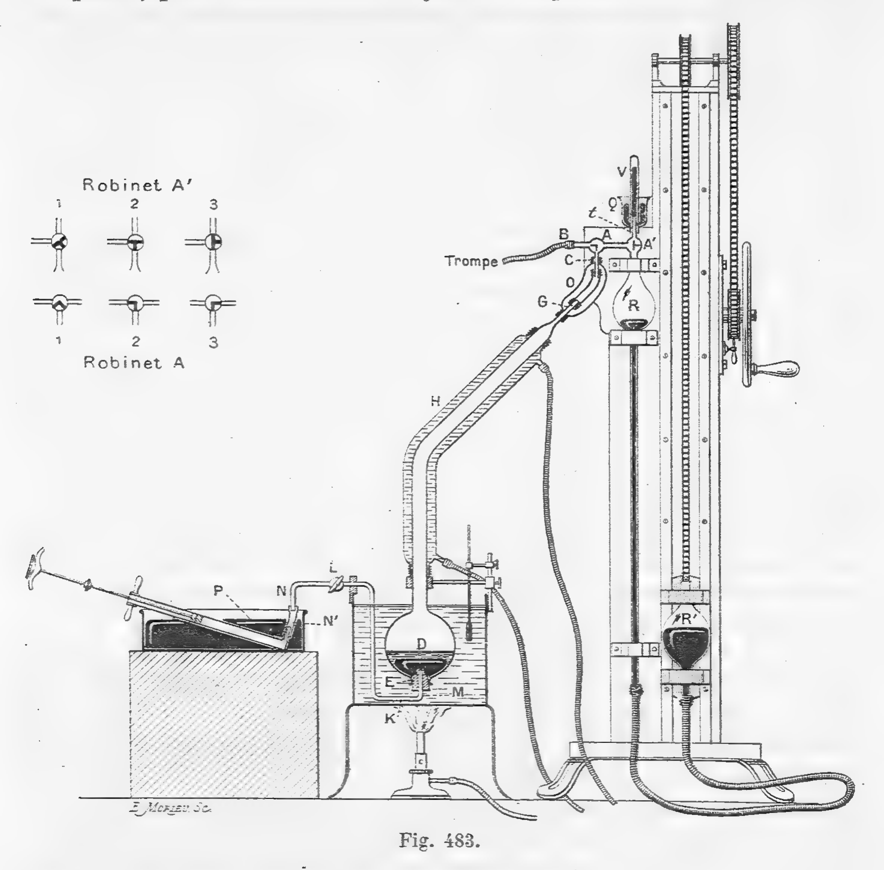


Fig. 483.

diffère pas beaucoup de celui de plusieurs auteurs, notamment de celui de Gréhant. Il est cependant plus commode et plus exact.

La pompe est une pompe à mercure ordinaire, mais à laquelle on a ajouté,

comme l'indique Gréhant (1), un robinet à trois voies A. L'une de ces voies C est mise en communication avec le réservoir D contenant le sang ; l'autre, B, communique avec une pompe qui fait le vide jusqu'à une certaine limite dans l'appareil, et épargne ainsi une partie des manœuvres à l'opérateur. Les deux tubes C et G sont réunis simplement par un tube de caoutchouc lié sur eux, mais ce tube doit être noyé complètement dans l'eau au moyen du manchon de caoutchouc O.

Le récipient où le sang sera chauffé est un ballon portant une tubulure E à sa partie inférieure, et dont le col, très allongé et coudé en son milieu, se termine par un tube plus étroit G qui se raccorde avec le tube C. Le col du ballon est entouré d'un long manchon de caoutchouc H qui est ligaturé à ses deux extrémités et qui sert de réfrigérant. Le sang est introduit dans le ballon par l'intermédiaire d'un tube K muni d'un robinet L. L'extrémité M de ce tube est fixée dans la tubulure du ballon par un bouchon de caoutchouc (2). L'autre extrémité N est munie d'un tube de caoutchouc très court, à calibre intérieur étroit, et qui servira de raccord entre l'extrémité du tube et l'extrémité C (fig. 482) de la seringue.

Cette extrémité N du tube K, et le tube de caoutchouc qu'elle porte plongent dans le mercure de la cuve P.

Voici maintenant la série des manœuvres à faire pour une extraction de gaz :

Le réservoir R et le tube t sont remplis complètement de mercure, et le robinet A′ fermé dans la position 1. Le robinet A est mis dans la position 2, et la trompe mise en marche ; cela fait, on ouvre le robinet L, de manière à remplir de mercure le tube K, et à en laisser pénétrer dans le ballon ; lorsque le mercure forme une couche de 2 ou 3 centimètres au-dessus du bouchon, on ferme L ; lorsqu'on a obtenu le vide que la trompe peut donner, on met le robinet A en position 3 ; on termine le vide avec la pompe. On abaisse R′ aussi bas que possible, puis on met A′ en position 2, et on met ce robinet en position 3 pendant quelques secondes, puis en position 1. On élève R′ avec précaution jusqu'un peu au-dessous de A′. On continue d'élever R′, jusqu'au-dessus du niveau du mercure sur la cuvette Q. L'air extrait du récipient D par le coup de pompe s'échappe au dehors. On met A′ en position 1, on abaisse à nouveau R′, et on reprend la manœuvre jusqu'à ce qu'un coup de pompe ne donne plus lieu à l'expulsion d'une bulle d'air.

On a soin, pendant que la pompe fonctionne et aussi dans les opérations ultérieures, de maintenir l'eau du récipient T à une température voisine de 60°, et de faire fonctionner le réfrigérant ; la première de ces précautions étant destinée à obtenir un vide plus parfait, la seconde à empêcher l'introduction d'eau dans le réservoir R.

Lorsqu'on a obtenu le vide le plus parfait que l'instrument peut donner, on procède à l'extraction du sang des vaisseaux de l'animal comme il a été indiqué plus haut, l'un des opérateurs opérant sur l'artère, l'autre sur la

(1) Gréhant, *Les gaz du sang*. Masson.

(2) Il est bon de priver de gaz ce bouchon au préalable par le chauffage dans le vide. On sait, en effet, que le caoutchouc retient des gaz, notamment de l'acide carbonique.

veine. L'aiguille est introduite au même moment dans les deux vaisseaux, et le sang extrait avec la même vitesse dans les deux cas jusqu'à ce que les pistons des seringues refusent d'avancer (1). Cela fait, chaque opérateur se rend avec sa seringue à sa pompe respective ; il enlève le tube de caoutchouc qui coiffe l'extrémité de la seringue (2), puis vient introduire cette extrémité sous le mercure, dans le tube de caoutchouc N', en tenant la seringue aussi horizontale que possible (3).

On ouvre le robinet L, et on pousse doucement le piston de la seringue si le vide ne suffit pas à l'attirer. Le sang pénètre dans le ballon D. Lorsque la seringue est vidée, on ferme L ; on retire la seringue, et on y aspire à nouveau 2 ou 3 centimètres cubes de la solution de sulfate de soude saturée et bouillie ; puis, remettant la seringue en place, on chasse ce sulfate de soude dans le ballon. La seringue et le tube K sont ainsi parfaitement lavés, et aucune parcelle de sang n'est perdue.

Lorsque cette opération est terminée, on ouvre L pour laisser pénétrer du mercure dans le tube K et en chasser tout le sulfate de soude, puis le robinet est fermé définitivement.

L'introduction du sang étant ainsi terminée, on élève la température de l'eau du réservoir T jusqu'à 65°. Il est bon de ne pas dépasser cette température qui est bien suffisante.

Avec une température supérieure, on risque beaucoup plus d'échauffer tout l'appareil et de laisser entraîner trop de vapeur d'eau qui se condensera dans le réservoir R et deviendra une cause d'erreur, comme on le verra par la suite.

On laisse chauffer pendant vingt minutes, une demi-heure même, *sans donner un seul coup de pompe*. Ce temps passé, on commence l'extraction des gaz qui se fait complètement en six ou sept coups de pompe.

La manœuvre pour l'extraction du gaz est la même que celle employée pour obtenir le vide préalable ; seulement, les gaz sont reçus dans une petite cloche coiffant l'extrémité du tube *t*. Je répète qu'il faut surtout éviter la condensation de vapeur d'eau dans le réservoir R. Cette eau est rejetée en même temps que les gaz dans la cloche V, et il ne faut pas oublier qu'elle dissout une très notable quantité de gaz dont il est fort difficile de tenir compte exactement. Le mieux est d'éviter complètement la présence de cette eau, ce qui est facile en prenant les précautions suivantes : de ne pas trop échauffer le ballon D ; de chauffer le sang quelque temps, vingt ou trente minutes, avant le premier coup de pompe ; de laisser un espace de cinq minutes entre les deux ou trois premiers coups de pompe ; de ne donner que six ou sept coups de pompe ; de faire passer dans le réfrigérant H de l'eau très froide, glacée si possible.

(1) Il est bon de n'aspirer le sang que très lentement. Un mouvement trop rapide provoquerait une dépression dans la seringue et le dégagement d'une certaine quantité des gaz du sang, ce qui peut faire croire à une rentrée d'air par le piston.

(2) Sous le mercure.

(3) Tout le sulfate de soude contenu dans le tube de caoutchouc est rentré dans la seringue, et, au moment où l'on enlève ce tube, il ne contient plus que du sang pur, et dont il n'y a pas à tenir compte.

Extraction des gaz du sang par la méthode et la pompe double à mercure de Chauveau. — Cette méthode consiste :

1° A extraire *simultanément, avec la même rapidité, sans interrompre le cours du sang dans le vaisseau*, un volume connu de sang artériel et de sang veineux ;

2° A extraire les gaz du sang artériel et du sang veineux, *simultanément, d'une manière absolument identique*, et dans le vide le plus parfait dont nous puissions disposer, le *vide barométrique*.

Il est inutile d'insister sur les avantages évidents qu'il y a à ne pas interrompre le cours du sang dans les vaisseaux pendant la prise de sang, ni sur l'exactitude plus parfaite des résultats, si les deux sangs, artériel et veineux, ont subi un traitement parfaitement identique.

Les explications qui suivent montreront que les manœuvres effectuées sur le sang artériel et le sang veineux sont absolument identiques pendant toute la durée de l'expérience, et que les résultats obtenus de cette manière sont parfaitement comparables.

Avant d'exposer le manuel opératoire, je parlerai des instruments employés :

1° Les seringues ;

2° La pompe double à mercure de Chauveau.

Les seringues employées sont, soit la seringue de Paul Bert modifiée (1), soit la seringue que j'ai décrite plus haut.

Le sang peut être mesuré soit en volume, soit en poids. Dans ce dernier cas, la seringue, quelle qu'elle soit, contenant 4 ou 5 centimètres cubes de mercure et environ 12 ou 13 centimètres cubes de solution saturée et bouillie de sulfate de soude, est pesée avant et après la prise de sang ; la différence de poids donne le poids de sang retiré ; on prend approximativement 25 centimètres cubes du sang. Ce procédé de mesure est le plus exact, la quantité de sang retirée pouvant être facilement connue à 1 milligramme près.

Lorsqu'on emploie la mesure en volume, les seringues sont préparées comme je l'ai indiqué antérieurement. On extrait automatiquement un volume de sang exactement connu d'avance.

Pompe double à mercure de Chauveau. — Cet appareil est formé de deux pompes à mercure A, B placées côte à côte et fonctionnant simultanément à l'aide du même réservoir C (fig. 486). Il n'y a rien de spécial à dire sur ces parties qui sont construites comme dans une pompe à mercure ordinaire, avec une ampoule en D, un robinet à trois voies en E et une cuvette à mercure en F, placée sur le tube H destiné à l'expulsion des gaz. Les extrémités inférieures des deux tubes AB sont réunies à un réservoir unique C par un tube en Y.

I, I sont deux ampoules destinées à recevoir le sang. Elles sont surmontées d'un tube K ayant un diamètre de 3 centimètres environ et une hauteur de 55 centimètres. Cette longueur est suffisante pour que la mousse produite pendant l'extraction des gaz ne risque jamais d'atteindre le robinet E. A sa

(1) La modification consiste dans la position latérale donnée au tube qui sert à l'introduction des liquides dans la seringue.

partie supérieure, le tube K devient plus étroit, et il se prolonge par un tube L d'un diamètre intérieur de 1 centimètre environ, très légèrement

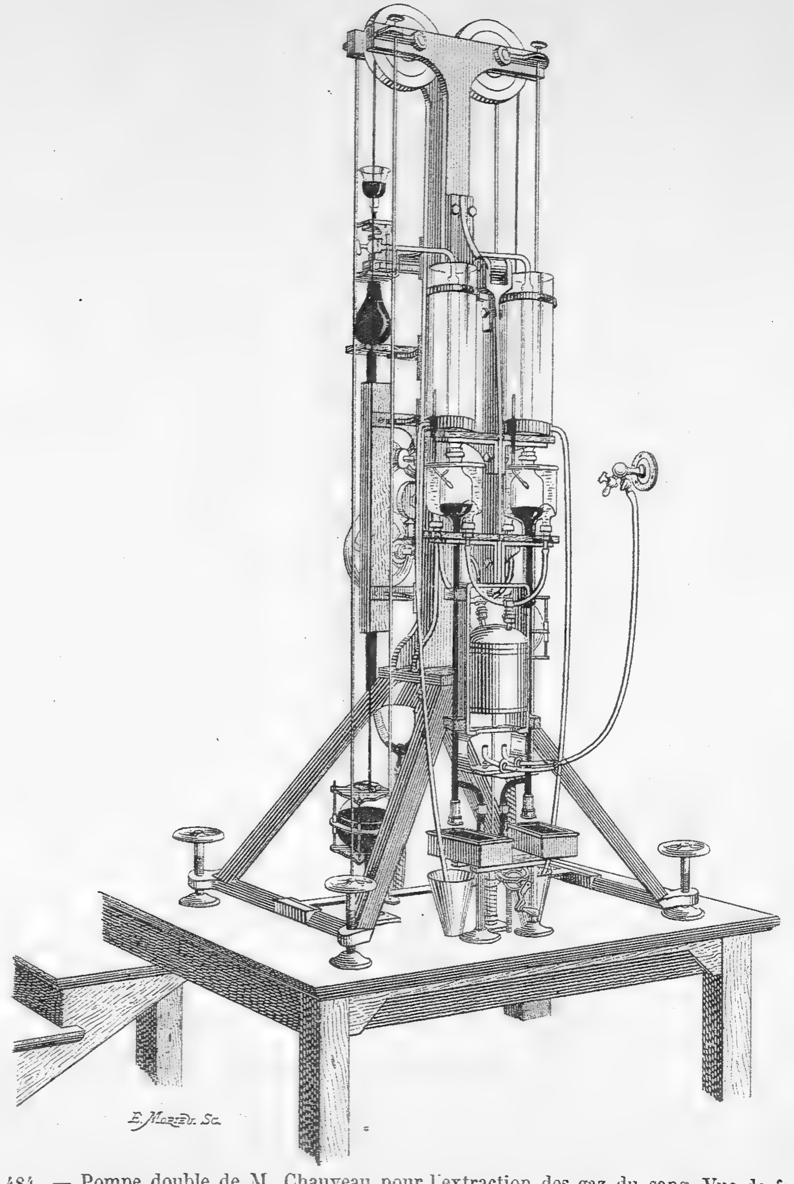


Fig. 484. — Pompe double de M. Chauveau pour l'extraction des gaz du sang. Vue de face.

incliné et se rendant au robinet E. Il constitue la troisième branche de ce robinet.

L'ampoule I se prolonge inférieurement par un tube M, d'une longueur de

80 centimètres, et plongeant sur une cuve à mercure N. A l'extrémité inférieure de ce tube, est mastiquée une pièce métallique O, munie d'un pas de vis; la pièce P, en se vissant sur la pièce O, vient obturer hermétiquement l'extrémité du tube. Dans sa partie inférieure, le tube M porte en outre une

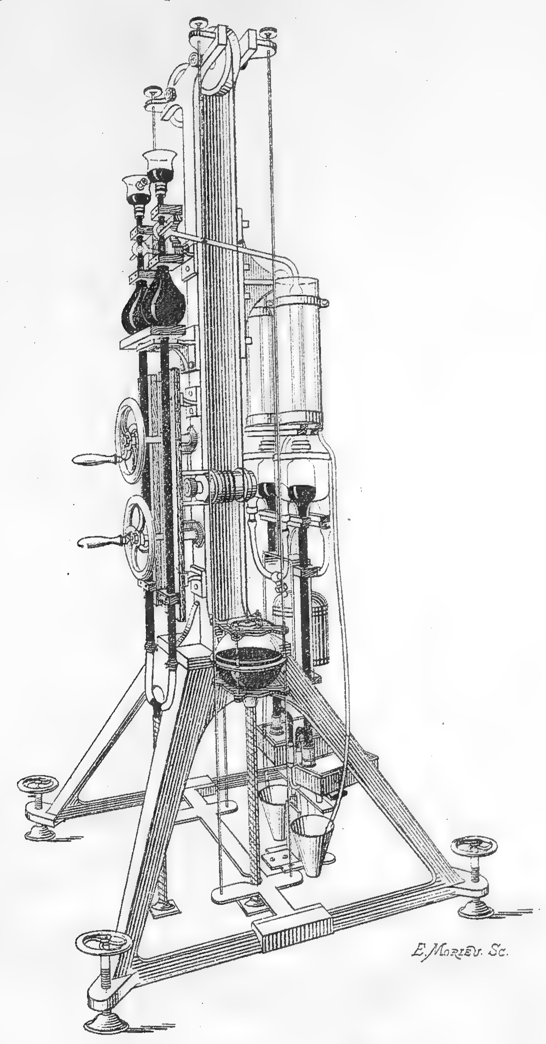


Fig. 485. — Vue de côté et en arrière.

branche latérale R, réunie à une branche semblable de l'autre pompe par un tube en Y, dont la troisième branche est reliée par le caoutchouc S au réservoir à mercure T.

A chaque pompe sont joints deux systèmes, l'un destiné à échauffer l'ampoule I, l'autre à refroidir le tube K pour condenser les vapeurs qui s'y engagent et empêcher la mousse produite par le sang de monter jusqu'en E.

Le premier système se compose de deux récipients en verre AA, fixés sur le tube M par un bouchon de caoutchouc, et dans lesquels plongent les deux ampoules I, I. Ces récipients portent inférieurement deux tubulures dans lesquelles s'engagent des tubes B, B, C, C (fig. 487), communiquant avec une marmite métallique D remplie d'eau. Les deux tubes B, B arrivent jusqu'au niveau de la partie supérieure du liquide dans les récipients A, A, tandis que les tubes C, C s'ouvrent au niveau des couches inférieures : B, B et C, C sont réunis respectivement par deux tubes métalliques E, en T, dont les branches supérieures sont recourbées en forme d'arc. L'un d'eux pénètre jusqu'au fond de la marmite ; l'autre s'arrête à la partie supérieure. La marmite est chauffée par deux becs Bunsen ; le système des tubes B, B, C, C fonctionnant à la manière des siphons, les deux récipients A, A contiennent toujours de l'eau à la même température, et l'extraction des gaz se fait des deux côtés dans les mêmes conditions.

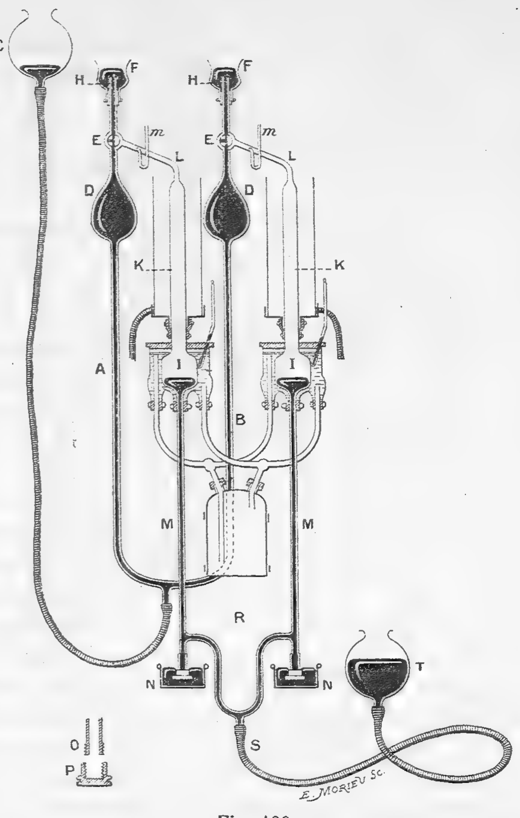


Fig. 486.

Le tube K est refroidi à l'aide d'un manchon de verre L que l'on remplit de fragments de glace. Ce manchon est mastiqué sur une armature métallique M fixée elle-même sur le tube K par un bouchon de caoutchouc. L'eau qui provient de la fusion de la glace s'écoule par le tube N.

Un manomètre *m*, placé sur le tube L (fig. 486), renseigne sur la pression à l'intérieur de la pompe.

Lorsqu'on veut faire une extraction de gaz du sang, on ajuste au préalable la vis P sur O, puis le robinet E (fig. 486) étant mis en position convenable pour chasser l'air de tout l'appareil, on élève les deux réservoirs C et T à un niveau supérieur à celui des réservoirs F, F. L'air de la pompe étant complètement chassé, on ferme E, puis on abaisse T jusqu'à ce que le niveau du mercure atteigne la partie inférieure de l'ampoule I. Le vide barométrique existe donc dans la partie LKI. Cela fait, les cuves N, N sont

élevées jusqu'à ce que la partie inférieure des tubes M, M plonge dans le mercure, et la pièce P est dévissée (1) ; il ne reste plus qu'à introduire le sang dans l'ampoule I (2).

La seringue contenant le sang est tenue horizontalement, le tube C dirigé en haut (fig. 482) ; on place l'index à l'extrémité de ce tube et on l'introduit sur la cuve à mercure à l'intérieur du tube M, en maintenant autant que possible la seringue en position horizontale ; on chasse le sang de la seringue, et il se rend dans l'ampoule I. Comme il peut en rester quelque peu sur les parois du tube M, on introduit dans la pompe, à l'aide de la seringue, quelques centimètres cubes d'une solution saturée et bouillie de sulfate de soude, qui lave le tube M. Cela fait, les pièces P (fig. 486) sont remises en place et vissées à fond.

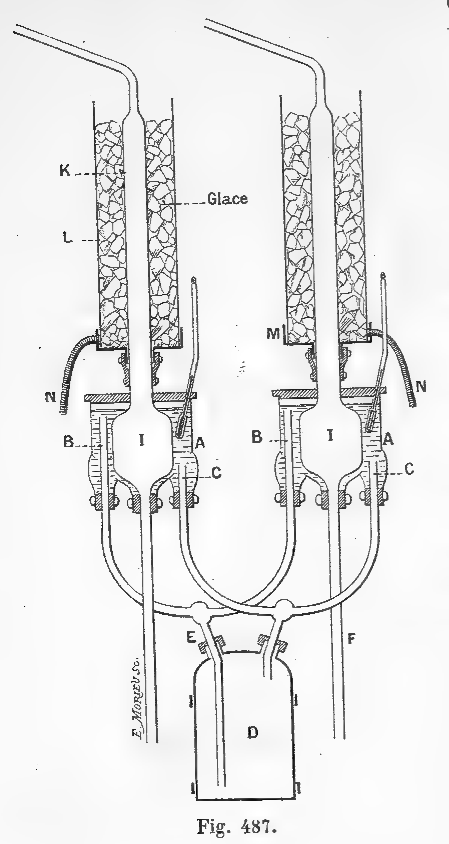


Fig. 487.

L'eau des réservoirs A, A (fig. 487) a été au préalable chauffée à une température de 65 ou 70°. On peut faire monter cette température à 75 ou 80°, dans les premiers moments, lorsque le sang vient d'être introduit dans la pompe, et cela dans le but de faciliter le dégagement des gaz. Mais au bout de vingt minutes ou une demi-heure, il est bon de revenir à 65° pour des motifs indiqués antérieurement. Après une demi-heure de chauffage, on donne un premier coup de pompe, qui donne la presque totalité des gaz, puis un second, cinq minutes après ; cinq ou six coups de pompe suffisent pour extraire la totalité des gaz. Il n'y a pas intérêt à pousser plus loin l'extraction, car on risque d'extraire de l'eau et de commettre par ce fait une erreur plus grande que celle que l'on voulait éviter. Il est, en effet, bien difficile, comme je l'ai déjà dit plus haut, de tenir compte exactement de la quantité de gaz dissoute par l'eau.

(1) Les cuves à mercure NN peuvent être élevées ou abaissées à volonté à l'aide d'une crémaillère mobile sur une roue dentée munie d'une manette. Elles peuvent aussi être enlevées très facilement pour permettre le nettoyage de l'appareil.

(2) Pour l'extraction du sang, on procède comme il a déjà été dit antérieurement : deux seringues sont préparées. Les vaisseaux de l'animal étant découverts, les deux opérateurs introduisent les aiguilles des seringues à l'intérieur de ces vaisseaux sans faire aucune ligature sur eux. Puis ils aspirent le sang simultanément et avec la même vitesse. Lorsque la seringue contient la quantité voulue de sang, on retire l'aiguille du vaisseau, et on enlève le tube de caoutchouc qui coiffe le tube C (fig. 482).

On doit avoir soin, pendant toute la durée du chauffage du sang, de maintenir le cylindre L (fig. 487) complètement rempli de glace.

Je rappelle que, les deux pompes étant actionnées par le même réservoir, l'extraction des gaz est faite d'une manière absolument comparable par les deux sangs, artériel et veineux. Le chauffage des deux sangs a été fait à la même température et pendant le même temps. Si l'on considère aussi la manière dont le sang a été extrait dans les deux cas, on en arrive à conclure que cette méthode donne évidemment des résultats aussi parfaits que possible, autant au point de vue de l'exactitude absolue pour chaque qualité de sang qu'au point de vue de la comparaison entre les deux sangs.

TENSION DES GAZ DANS LE SANG

A. ***Oxygène.*** — L'oxygène existe sous deux formes dans le sang :

1° A l'état de combinaison avec l'hémoglobine (oxyhémoglobine);

2° A l'état de dissolution.

La portion qui existe à l'état de dissolution varie selon la loi de Henry, c'est-à-dire est proportionnelle à la tension que l'oxygène possède au voisinage immédiat de la surface de l'alvéole pulmonaire (1).

L'autre portion d'oxygène qui est combinée échappe à l'influence de la pression et se fixe sur l'hémoglobine dans le poumon, quelle que soit la tension de l'oxygène dans l'air intrapulmonaire, pourvu que cette tension reste supérieure à 20 millimètres de mercure. En effet, la tension de dissociation de l'hémoglobine, mesurée par Vorm Müller (2), est de 20 millimètres de mercure à 12° ; l'hémoglobine fixe donc toujours l'oxygène lorsque ce gaz est à une tension supérieure à 20 millimètres de mercure. Elle le fixe avec une rapidité d'autant plus grande que la tension est plus élevée, mais elle n'en fixe pas une plus grande quantité. Si le sang qui sort du poumon contient des quantités variables d'oxygène chez le même animal, cela tient aux différences de vitesse du sang pendant son passage à travers le poumon, et à ce qu'il n'y séjourne pas assez longtemps pour que son hémoglobine soit totalement transformée en oxyhémoglobine.

La proportion d'hémoglobine non transformée dans le poumon diminue à mesure que la tension de l'oxygène augmente dans l'air inspiré. La portion non transformée est toujours très faible dans les conditions physiologiques.

C'est grâce à sa faible tension de dissociation que l'hémoglobine peut se transformer *totalement* en oxyhémoglobine lorsqu'elle est en présence d'une atmosphère contenant de l'oxygène à une tension de 3 p. 100 seulement d'une atmosphère (23 millimètres de mercure) (Holmgren, Vorm Müller, Hüffner). Il suffit qu'elle y reste un temps suffisant.

La dissociation de l'oxyhémoglobine commence dès que la tension de l'oxygène descend au-dessous de 20 millimètres de mercure, et quel que soit

(1) Il ne s'agit ici que du sang qui traverse le poumon.

(2) Vorm Muller, *Arbeiten a. d. Physiol. anstalt zu Leipzig*, 1870.

le milieu avec lequel elle est en contact : vide, gaz inerte, sérum, etc. Elle s'opère de même en présence des agents réducteurs.

L'oxygène mis en liberté par dissociation de l'oxyhémoglobine se dissout dans le plasma. Lorsque la tension de l'oxygène dans ce liquide descend au-dessous de 20 millimètres de mercure, une certaine quantité d'hémoglobine se dissocie jusqu'à ce que la tension ait remonté à 20 millimètres au minimum.

La tension de l'oxygène dans les tissus, muscles ou autres, est à peu près nulle si elle ne l'est pas complètement. On n'a jamais pu en extraire ce gaz en quantité appréciable.

La figure ci-dessous représente d'après Hüffner la courbe des quantités d'oxygène fixées par 100 centimètres cubes de sang de chien pour des tensions

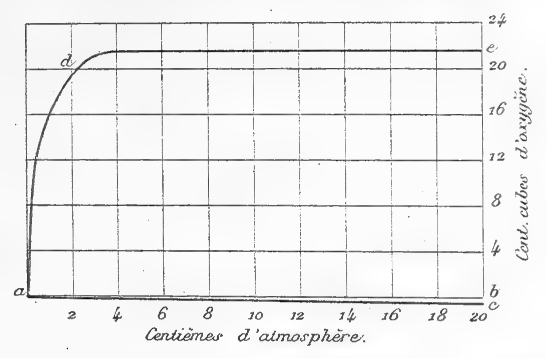


Fig. 488. — *ade*, courbe représentant les quantités d'oxygène (en centimètres cubes à 0° et 760 millimètres) combinées aux 14 grammes d'hémoglobine contenus dans 100 centimètres cubes de sang de chien (saturé d'O), aux différentes pressions partielles de l'oxygène comprises entre 0 (vide) et 20 p. 100 (air atmosphérique) d'une atmosphère (température + 35°). La courbe *ac*, tracée sous l'abscisse *ab*, représente la quantité d'oxygène simplement dissoute. Les courbes *ade* et *ac* additionnées représentent les quantités totales d'oxygène absorbables par le sang de chien.

variables de ce gaz et le rapport entre les quantités fixées par l'hémoglobine et celles dissoutes par le plasma.

La tension de l'oxygène dans le sang, mesurée avec l'aérotonomètre, a été trouvée :

1° Dans le sang artériel, de 91 à 114 millimètres de mercure ;

2° Dans le sang veineux, de 22 millimètres de mercure environ.

B. ***Acide carbonique***. — L'acide carbonique se trouve dans le sang à l'état de dissolution et à l'état de combinaison.

L'acide carbonique combiné se trouve à l'état de carbonates, bicarbonates et de phosphocarbonates de soude. Les bicarbonates et phosphocarbonates étant les seuls sels du sang qui aient une tension de dissociation (faible) à la température du corps, sont les seuls qui peuvent se dissocier dans le poumon en donnant naissance l'un à du carbonate neutre de soude et à de l'acide carbonique, l'autre à du phosphate neutre, à du carbonate neutre de soude et à CO^2.

Il est probable que la majeure partie de l'acide carbonique combiné est à

l'état de bicarbonate. Cette portion varie naturellement dans le même sens que la portion dissoute et ces deux portions tendent continuellement à se mettre en équilibre.

Nous ne savons pas actuellement si l'acide carbonique exhalé dans le poumon provient d'autres sources que celles que je viens d'indiquer.

Les gaz extraits du sang par la pompe contiennent une bien plus forte proportion d'acide carbonique ; la presque totalité de l'acide carbonique fixée sur les carbonates est extraite. L'expérience suivante permet en partie de se rendre compte de cette décomposition presque totale des carbonates :

On sait que certaines substances albuminoïdes, et particulièrement l'oxyhémoglobine, peuvent jouer le rôle d'acides faibles et décomposer les carbonates, lorsque ceux-ci sont en présence d'acide carbonique à une très faible tension, ou mieux encore du vide. En effet, si à la fin d'une extraction de gaz du sang on introduit dans la pompe une solution de carbonate de soude privée de gaz, on voit ce corps se décomposer en donnant naissance à un volume considérable d'acide carbonique.

La tension de l'acide carbonique dans le sang, recherchée avec l'aérotonomètre, a été trouvée :

1° Dans le sang veineux (artère pulmonaire), de 26 à 41 millimètres de mercure ;

2° Dans le sang artériel, de 21 millimètres de mercure.

MESURE DE LA TENSION DE GAZ DANS LE SANG

Cette mesure se fait avec l'aérotonomètre. La méthode consiste à mettre le sang en contact avec une atmosphère de composition connue et contenant de l'oxygène et de l'acide carbonique (ou un seul de ces gaz) à une tension différente de celle qu'on leur attribue dans le sang. Le sang absorbe une partie des gaz de l'atmosphère ou lui en cède une partie des siens. L'expérience est terminée lorsque l'équilibre s'est établi entre les deux milieux, c'est-à-dire lorsque la composition de l'atmosphère gazeuse demeure invariable.

La tension nouvelle de chaque gaz dans le mélange représente la tension qu'il possède dans le sang.

Dans l'aérotonomètre de Pflüger, l'expérience se fait à la fois sur deux mélanges gazeux de composition différente contenus dans deux tubes verticaux et parallèles reliés à leur partie supérieure à un tube unique par lequel arrive le sang. L'un des tubes contient les gaz à une tension supérieure, l'autre à une tension inférieure de celle qu'on leur suppose dans le sang ; comme c'est le même sang qui passe dans les deux tubes, on a à la fin de l'expérience les mêmes tensions d'oxygène et d'acide carbonique dans les deux tubes.

J'ai donné plus haut les tensions trouvées pour le sang artériel et le sang veineux à l'aide de cette méthode.

PHÉNOMÈNES PHYSIQUES DE LA RESPIRATION

Par M. J. TISSOT.

Mécanisme de la respiration. — Élasticité pulmonaire et pression intrapleurale. — Pneumographie. — Bruits respiratoires. — Rapports entre les tensions partielles des gaz dans l'air intrapulmonaire et dans le sang. — Mesure des quotients, coefficients et du débit respiratoires.

MÉCANISME DE LA RESPIRATION

Le poumon peut être assimilé à un sac très élastique placé dans une cavité quelque peu élastique aussi, et contre les parois de laquelle il est intimement appliqué. En vertu de la pression atmosphérique, de l'élasticité du poumon, et du vide qui existe entre le poumon et la paroi thoracique, le poumon est obligé de suivre toutes les évolutions de la paroi thoracique. L'inspiration se produit par le jeu des muscles respiratoires, et est un phénomène actif. L'expiration est un phénomène passif; la paroi thoracique revient à sa position normale en vertu de son élasticité et aussi probablement en vertu de l'élasticité considérable du poumon qui la sollicite à se rétracter.

Élasticité pulmonaire et pression intrapleurale. — Elle est considérable. Le poumon est toujours en état de tension élastique. Cette élasticité et cet état de tension élastique, même chez le cadavre, sont démontrés par l'ouverture du thorax. L'air se précipite en sifflant dans la cavité pleurale, et le poumon, satisfaisant son élasticité, se vide presque complètement de l'air qu'il contenait.

Si, avant l'ouverture du thorax, on a mis un manomètre en communication avec la trachée au lieu de laisser l'air s'échapper au dehors, l'élasticité du poumon élève la pression de l'air qu'il contient de 5 millimètres de mercure.

Cette pression est équivalente à la dépression qui existait dans la plèvre avant l'ouverture du thorax. On attribue à la dépression intrapleurale une valeur moyenne de 10 à 15 millimètres de mercure dans l'inspiration paisible et de 30 millimètres dans une inspiration forcée. Dans l'expiration ordinaire, la dépression intrapleurale ne diminuerait que de 6 ou 8 millimètres de mercure; tant que la glotte reste ouverte, la pression intrapleurale reste négative, même dans une expiration forcée. Elle ne peut devenir positive que dans le cas d'une expiration forcée avec la glotte fermée, après avoir fait préalablement une inspiration forcée. La pression intrapulmonaire monterait dans ce cas à 240 millimètres de mercure, d'après Valentin : celle de la plèvre serait donc de $240 - 15 = 225$ millimètres de mercure.

Dans l'expérience de Müller (inspiration forcée en fermant la glotte après avoir au préalable fait une expiration forcée), la dépression développée ajoutée à la dépression pleurale normale peuvent atteindre une telle valeur que la pression devient négative dans les oreillettes et que le sang cesse d'arriver dans les ventricules; il en résulte des troubles circulatoires et cérébraux passagers.

L'expérience suivante de d'Arsonval permet à la fois de mesurer exactement sur le sujet vivant la pression intrapleurale et d'inscrire ses variations pendant les différentes périodes de la respiration :

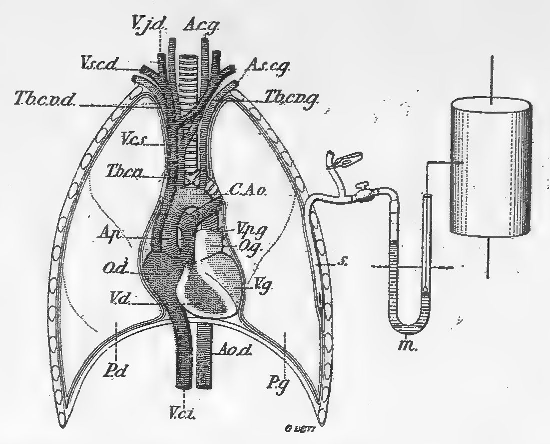


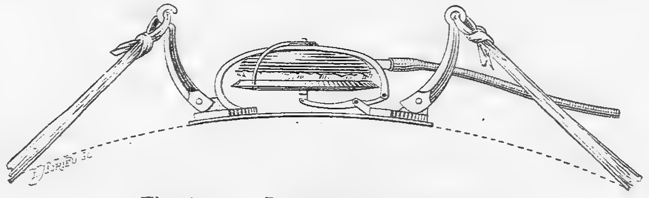
Fig. 489. — Mesure de l'élasticité pulmonaire par la pression intrathoracique.

Coupe du thorax avec les poumons, le cœur et les principaux vaisseaux; — *s*, sonde de gomme introduite dans la plèvre et reliée à un manomètre inscripteur *m*. Dans la pratique, ce manomètre doit être un tambour de Marey étalonné, pour éviter l'inertie du liquide.

Une sonde en gomme est introduite dans la cavité pleurale par un espace intercostal; on aspire par l'extrémité de la sonde l'air qui s'est introduit dans la cavité pleurale au moment de son ouverture et on relie cette sonde à un manomètre à eau enregistreur. On obtient dans cette expérience des tracés qui reproduisent fidèlement les moindres variations de la pression intrapleurale et qui présentent la plus grande analogie avec les tracés obtenus par les autres méthodes pneumographiques.

PNEUMOGRAPHIE

Les pneumographes sont des appareils inscrivant les mouvements de la paroi thoracique. Ils sont tous basés sur le même principe : déformation de la membrane d'un tambour à levier par la traction d'une courroie inextensible faisant le tour du thorax. Les figures 490 et 491 représentent les deux modèles les plus usités.


Fig. 490. — Pneumographe de Marey.

Un appareil encore très pratique, et plus communément employé dans les

laboratoires, consiste en un tube de caoutchouc assez large fixé à ses deux extrémités sur deux disques rigides ; un des disques porte une tubulure qui permet de relier l'appareil à un tambour à levier. Une courroie inextensible reliée aux deux disques détermine à chaque inspiration l'allongement du tube de caoutchouc. Cet appareil présente l'avantage de pouvoir être adapté même aux plus petits animaux.

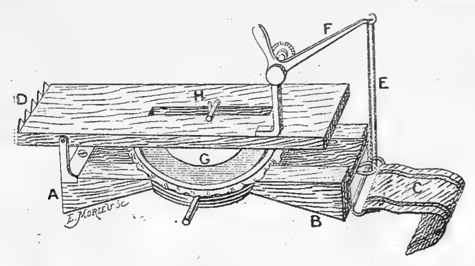


Fig. 491. — Pnéographe de Laulanié. — AB, plaque de bois portant le tambour explorateur ; C, ceinture entourant le thorax ou l'abdomen et venant s'attacher sur le peigne D. La traction exercée sur D se transmet au tambour ; E, ressort de caoutchouc servant à graduer la tension de l'appareil.

De nombreuses autres méthodes ont été employées par différents auteurs pour inscrire les déplacements de l'air dans les voies respiratoires. Je ne citerai que les plus originales :

Hering enfermait son animal dans un espace clos, et faisait arriver l'air extérieur aux poumons par un tube traversant la paroi et une canule trachéales. Il inscrivait les variations de volume de l'espace clos, dus aux mouvements respiratoires.

Rosenthal inscrivait les mouvements respiratoires du lapin à l'aide d'un *phrénographe*.

Un autre procédé consiste à mettre le poumon de l'animal en relation avec un spiromètre au moyen d'une muselière ou d'une canule trachéale (spiromètre de Panum). Ce procédé est excellent, mais ne peut être employé que pendant peu de temps (quelques minutes), à moins d'employer un spiromètre de grand volume, et d'avoir un mode d'inscription particulier.

La dernière catégorie d'appareils ou de procédés que je vais décrire fournit des graphiques respiratoires qui permettent de connaître approximativement les variations de vitesse et de pression de l'air dans les voies aériennes ainsi que le volume d'air qui a traversé ces voies.

Vitesse de l'air et variation de la pression dans les voies respiratoires; volume d'air mis en circulation. — L'*anaphographe de Bergeon et Kastus* est construit sur le principe de l'hémodromographe ; on inscrit les mouvements d'une valve placée sur le trajet de l'air respiratoire. Cet appareil ne donne que des indications très approximatives, et à la condition d'avoir au préalable procédé à un étalonnage avec des courants d'air de vitesse connue. Il ne donne que des indications de vitesse.

Un procédé beaucoup plus précis consiste à introduire dans la trachée une canule piquante assez large reliée à un tambour à levier. Ce procédé donne d'excellentes indications si l'on a procédé au préalable à un étalonnage soigneux de l'appareil. Il donne des indications absolues de pression. Si l'on fait cette mesure simultanément en deux points différents, on en déduit facilement la vitesse du courant d'air : les vitesses sont proportionnelles aux carrés des pressions (Chauveau).

Un autre procédé, qui avec un étalonnage peut donner de bons résultats,

consiste à placer à l'orifice (exactement) d'une narine la section d'un tube de caoutchouc ou métallique relié à un tambour à levier, ou encore mieux de faire passer la totalité de l'air respiratoire dans un tube métallique court portant une tubulure latérale reliée à un tambour (Chauveau).

Les indications les meilleures données par ces différents appareils et procédés sont les indications de vitesse; des étalonnages permettent d'arriver à calculer, au moyen de la courbe obtenue, le volume d'air qui est entré ou sorti de l'appareil respiratoire, mais d'une façon tout à fait approximative.

Un autre procédé destiné à mesurer les pressions intrapleurales et qui donne d'excellents tracés pneumographiques, mais ayant une signification un peu différente, est décrit page 739.

On a employé d'autres procédés plus précis pour connaître le volume d'air expulsé à chaque expiration ou introduit pendant l'inspiration. On peut faire passer l'air inspiré ou expiré, au moyen de soupapes de Muller, dans un compteur spécial qui donne directement le volume d'air à chaque mouvement respiratoire. Ce procédé a un inconvénient. Il gêne considérablement la respiration.

Il vaut mieux emmagasiner l'air dans un gazomètre qui totalise les masses d'air de plusieurs expirations. Je renvoie à la description d'un procédé extrêmement précis, décrit dans ce volume, pour effectuer ce genre de mesure.

BRUITS RESPIRATOIRES

L'auscultation des différents points de l'appareil respiratoire chez le sujet sain permet de percevoir différents bruits normaux. L'auscultation des différentes régions se fait avec la plus grande finesse à l'aide du stéthoscope de M. Chauveau figuré ci-dessous. Sa cavité est creusée dans une forte masse métallique qui a pour effet d'éteindre les bruits extérieurs et de renforcer les sons.

Il existe deux bruits normaux : le *souffle laryngo-trachéal* et le *murmure vésiculaire*. C'est Delafond le premier qui a montré que le souffle laryngo-trachéal a son siège au niveau du larynx. Il constata que si l'on sectionne la trachée et qu'on attire au dehors le bout inférieur, le souffle laryngo-trachéal disparaît.

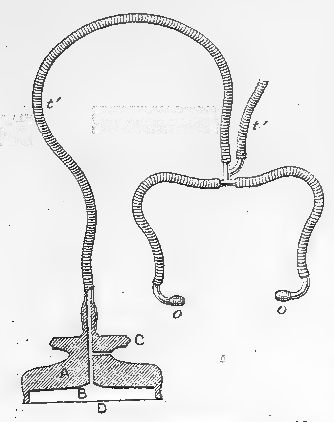
Mais c'est à M. Chauveau que revient le mérite d'avoir établi la cause et le mécanisme des souffles respiratoires. Partant de ce principe qu'il se produit une veine fluide soufflante chaque fois (1) que l'air passe brusquement d'un espace étroit dans un espace élargi, il montra :

1° Que le souffle laryngo-trachéal a son siège au niveau de l'orifice glottique;

2° Que le murmure vésiculaire reconnaît pour cause le passage de l'air des bronchioles (canal étroit) dans les alvéoles pulmonaires (cavité beaucoup plus large).

(1) Il faut néanmoins que le rapport entre la section de l'espace étroit et celle de l'espace large ait une certaine valeur. Ce rapport exerce une influence prépondérante sur l'intensité des bruits et sur leurs caractères.

Le souffle laryngo-trachéal s'entend à l'inspiration et à l'expiration, ou plutôt il y a deux souffles *laryngo-trachéaux* différents ; le bruit inspiratoire le plus fort, durant pendant la totalité de l'inspiration, est dû au passage de l'air de la glotte (orifice étroit) dans la partie inférieure du larynx (large cavité), ce qui explique son intensité. Le bruit expiratoire est plus court et ne s'entend que dans la première partie de l'expiration. Il se produit par le passage de l'air de la glotte dans le pharynx.



g. 492. — Stéthoscope de M. Chauveau (figure à demi schématique). — B, cavité en entonnoir creusée dans une masse métallique et fermée par une membrane élastique; D *t*, tube reliant la cavité aux conduits auditifs par l'intermédiaire des embouts *o* ; *t'*, tube collatéral dont la présence améliore le son. Ce tube est inutile quand la caisse métallique est elle-même pourvue d'un orifice collatéral, ce qui est le cas dans la figure.

M. Chauveau a donné à l'expérience de Delafond une forme beaucoup plus élégante en mettant à l'extrémité du bout inférieur de la trachée un tube sur lequel on peut adapter des orifices de diamètres différents. En introduisant un rétrécissement à l'extrémité du tube, on fait reparaître un souffle analogue au souffle laryngo-trachéal inspiratoire. En remplaçant ce rétrécissement par un autre précédé d'une cavité plus ou moins large, on fait reparaître à la fois le bruit inspiratoire et le bruit expiratoire.

M. Chauveau a encore répété cette expérience d'une manière très élégante sur des animaux pneumoniques auxquels il sectionnait la trachée. Le souffle pneumonique disparaissait lorsqu'on empêchait l'air de passer par le larynx. Il reparaissait lorsqu'on rétablissait la continuité ou lorsqu'on adaptait un rétrécissement à l'extrémité du bout inférieur de la trachée. Cette expérience lui a permis de démontrer, en outre, que le souffle pneumonique n'est pas un *souffle anormal nouveau*, mais qu'il est dû à la propagation anormale à travers le poumon, devenu dense et meilleur conducteur du son, d'un bruit normal, le bruit laryngo-trachéal.

Le *murmure vésiculaire* s'étend sur toute la surface du poumon accessible a l'oreille. C'est un bruit doux, moelleux, uniforme, qui s'entend pendant toute la durée de l'inspiration.

L'expiration est complètement silencieuse dans l'espèce humaine. Cette règle n'est absolue que chez l'enfant. Chez l'homme adulte, on entend fréquemment un souffle très bref, plus rude que celui de l'inspiration et qui ne s'entend que tout à fait au début de l'expiration.

J'ai indiqué plus haut la cause du murmure vésiculaire : la formation dans les alvéoles pulmonaires d'une innombrable quantité de petites veines fluides soufflantes. La démonstration de ce fait est donnée par l'expérience suivante de M. Chauveau : la section unilatérale du pneumogastrique fait disparaître le murmure vésiculaire dans le poumon du même côté; la section bilatérale l'abolit des deux côtés. Or la section du pneumogastrique a pour effet de paralyser les fibres musculaires des bronches et bronchioles et, par

suite, d'augmenter leur calibre, de telle sorte qu'à son entrée dans la vésicule pulmonaire, la bronchiole ne réunit plus les conditions nécessaires à la production d'une veine fluide soufflante.

RAPPORTS ENTRE LES TENSIONS PARTIELLES DES GAZ DANS L'AIR INTRAPULMONAIRE ET DANS LE SANG; DIFFUSION DES GAZ

La tension des gaz dans l'air contenu dans les voies respiratoires est différente suivant les points où l'échantillon analysé est pris.

La masse gazeuse du poumon amenée brusquement de la trachée à un flacon dans lequel on a fait le vide a, d'après P. Bert, la composition suivante :

Azote	79 p. 100
Oxygène	11 à 14 —
Acide carbonique	5 à 8 —
	Tension en mm. de Hg.
Azote	»
Oxygène	83 à 106^{mm}
Acide carbonique	38 à 60^{mm}

Ch. Bohr a trouvé, en prélevant un échantillon au niveau de la bifurcation des bronches :

Acide carbonique	2,57 p. 100
Oxygène	16,36 —
	Tension en mm. de Hg.
Acide carbonique	16^{mm},36
Oxygène	124^{mm}

Volfberg et Nussbaum, en isolant une bronche à l'aide d'une sonde, puis extrayant son contenu d'air, ont trouvé de 3,8 à 5,4 p. 100 d'une atmosphère, d'acide carbonique. Ces chiffres sont probablement plus forts que les chiffres réels, car la ventilation est supprimée dans la bronche isolée et l'air séjourne plus longtemps en contact avec les capillaires pulmonaires; cette expérience réalise en partie celle de l'aérotonomètre.

Le tableau suivant indique les tensions moyennes trouvées dans le sang veineux et dans l'air alvéolaire (1) :

	Sang veineux.	Air alvéolaire.	Air atmosphérique.
Oxygène	22 millim. de Hg.	145^{mm},6 en moy.	60 millim.
Acide carbonique	29 à 41 millim. de Hg.	21 millim.	0 (ou à peu près).

Pour bien comprendre l'importance du mouvement de diffusion qui s'opère entre la surface pulmonaire et l'air, il faut considérer le poumon à la fin d'une inspiration. L'alvéole, en se dilatant, a fait un appel d'air pur ou beaucoup moins altéré que celui qu'il vient de rejeter, de sorte que la tension de l'oxygène dans son intérieur est probablement plus forte, celle de l'acide carbonique plus faible que celle qui est indiquée dans le tableau ci-dessus. Les expériences pour déterminer cette tension ne donnent en effet que la tension dans l'air expiré et tous les chiffres donnés par Ch. Bohr sont probablement les plus exacts.

(1) Pour la mesure de la tension des gaz dans le sang, voy. p. 737

Les lois de la diffusion exigent, d'après le tableau ci-dessus, qu'il s'établisse un courant gazeux des lieux à tension élevée vers ceux à tension faible, c'est-à-dire un courant d'acide carbonique du sang à l'air et un courant d'oxygène de l'air au sang.

Quant au mécanisme intime de cette diffusion de la surface du poumon à l'air (1), il est très probablement conforme à la loi établie par Exner:

La quantité de gaz qui traverse une membrane liquide est proportionnelle au coefficient de solubilité du gaz dans le liquide et en raison inverse de la racine carrée de ce gaz.

MESURE DES QUOTIENTS, COEFFICIENTS ET DU DÉBIT RESPIRATOIRES

On désigne par coefficients respiratoires les quantités absolues d'oxygène absorbé et d'acide carbonique exhalé pendant un temps donné (l'heure par exemple), par un kilogramme d'animal.

La comparaison des coefficients respiratoires exprimés en oxygène est préférable et donne des indications d'une valeur très supérieure à la comparaison des coefficients en acide carbonique; c'est un fait démontré par l'expérimentation et dont on peut donner aussi une démonstration par le raisonnement.

Le quotient respiratoire est le rapport $\frac{CO^2}{O^2}$ de l'acide carbonique exhalé à l'oxygène absorbé par un animal pendant un temps quelconque, aussi court que possible; le quotient respiratoire subit en effet des variations qui peuvent être très rapides et importantes pendant un temps très court, suivant les conditions expérimentales.

Méthode du confinement. — Cette méthode, inaugurée par Lavoisier, est la plus exacte de toutes. Elle consiste à enfermer l'animal dans une enceinte hermétiquement close dont le volume d'air est exactement mesuré au commencement et à la fin de l'expérience. L'analyse de l'air final permet de connaître exactement le volume d'acide carbonique exhalé et d'oxygène absorbé par l'animal. On a objecté à cette méthode que les échanges respiratoires ne s'effectuent plus d'une façon normale lorsque les modifications de l'air ont atteint une certaine valeur. Laulanié a montré que l'animal absorbe l'oxygène d'une façon normale tant que la tension de ce gaz n'est pas tombée au-dessous de 14 à 12 p. 100. D'autre part, dans les nombreuses expériences faites sur l'homme en état de travail dans des enceintes calorimétriques complètement closes, par M. Chauveau, on n'a jamais constaté la moindre gêne du sujet, même lorsque la tension de l'oxygène descendait jusqu'à 15 p. 100 d'une atmosphère.

Il est donc facile, par la limitation de la durée des expériences, de rester dans des conditions physiologiques.

(1) La surface pulmonaire peut être assimilée à une membrane liquide. Je laisse systématiquement de côté les hypothèses d'après lesquelles cette loi serait modifiée par les actions chimiques particulières ou par l'activité vitale des cellules.

Lorsque cette méthode est employée avec les précautions indiquées par M. Chauveau, elle donne des résultats d'une exactitude irréprochable. Les erreurs possibles résultent de la mesure du volume d'air des enceintes, lorsque celles-ci sont grandes et ont une capacité de plusieurs mètres cubes. Dans ces cas, la température n'est pas uniforme dans l'appareil, et c'est là une cause d'erreur importante. Elle disparaît en grande partie si l'on imprime dans l'enceinte un courant violent à l'air, comme le fait M. Chauveau par différents procédés. Une autre difficulté est d'obtenir une étanchéité absolue pour de grandes chambres respiratoires. On fait encore disparaître cette cause d'erreur si l'on emploie, comme le fait M. Chauveau pour ses chambres respiratoires, un gazomètre dérivateur (Voy. p. 754) construit de telle sorte qu'il n'y a jamais à l'intérieur de l'enceinte de pression ou dépression *mesurable, même avec un manomètre à eau.* Si l'on s'est assuré que la chambre respiratoire tient une pression de 1 ou 2 millimètres d'eau seulement, sans le gazomètre, on peut avoir la certitude absolue qu'aucune sortie ou rentrée d'air n'est possible.

Méthode du confinement sans modification (approximativement) de la composition de l'atmosphère. — *Appareil de Regnault et Reiset. Oxygénographe de Laulanié.* — Je rappellerai seulement les principes de l'appareil qu'on trouve décrits dans tous les traités de physiologie.

L'animal est placé dans une cloche hermétiquement close qui est reliée d'une part avec un système destiné à absorber l'acide carbonique et d'autre part avec un ballon placé sur l'eau et contenant de l'oxygène qui afflue dans la cloche au fur et à mesure qu'il y est appelé par la dépression que cause l'absorption de l'acide carbonique. Ce dernier est absorbé par une solution de potasse contenue dans deux réservoirs suspendus à l'extrémité d'un fléau auquel on imprime un mouvement de balancement qui détermine alternativement dans chaque boule une aspiration et un refoulement de l'air de la cloche. L'acide carbonique est dosé dans la solution de potasse et l'oxygène restant dans le ballon mesuré directement.

Cet appareil a subi de nombreuses modifications par les différents auteurs qui l'ont employé. Je ne citerai que la plus intéressante et originale due à Laulanié.

L'appareil destiné à absorber l'acide carbonique est composé de plusieurs flacons laveurs à potasse dans lesquels l'air, appelé par une pompe double à mercure, passe deux fois.

L'oxygène, fourni par un gazomètre inscripteur, passe dans un flacon laveur qui à la fois sert de témoin et empêche la diffusion des gaz.

Méthode de la ventilation. — *Appareil de Petenkofer et Voit. Appareil à échantillonnage continu et proportionnel de Laulanié.* — Cette méthode consiste à placer un animal dans une enceinte traversée par un courant d'air de débit connu. L'air est analysé à la sortie ; la masse d'air qui a passé dans l'enceinte étant aussi connue, on calcule facilement les coefficients.

L'enceinte de Petenkofer et Voit a une capacité de 20 mètres cubes ; la ventilation est extrêmement énergique ; l'air sortant passe dans un compteur. Une portion connue de cet air, obtenue par dérivation sur le courant total

d'air sortant, passe sur de la ponce imbibée d'acide sulfurique, puis dans des barboteurs à baryte. La même détermination en vapeur d'eau et acide carbonique est faite sur l'air entrant. L'acide carbonique seul est dosé; l'oxygène se déduit de l'équation :

$$\text{Oxygène} = \textit{excreta} + CO^2 - \textit{ingesta}$$

Cette manière de calculer l'oxygène est sujette à de grosses erreurs à cause des variations de poids de l'animal.

D'autre part, la minime quantité d'acide carbonique dosée dans une quantité d'air excessivement petite relativement à la quantité totale, donne une valeur très importante aux erreurs d'analyse qui sont multipliées par un coefficient très élevé.

Laulanié a construit un appareil qui, tout en maintenant une ventilation très suffisante, permet de faire l'analyse eudiométrique à l'aide d'un échantillonnage continu et proportionnel. Dans les expériences de Laulanié, la proportion d'acide carbonique ne dépassait jamais 2 à 3 p. 100 dans l'air entraîné ; cette proportion, qui ne peut avoir aucune influence sur l'animal, permet de réduire les erreurs d'analyse et de calcul à un taux très faible (1).

Méthode de Hanriot et Ch. Richet. — Elle consiste à faire passer dans un compteur l'air entrant, qui arrive à l'animal au moyen d'un masque, et l'air expiré dans deux compteurs entre lesquels est placé un appareil à potasse.

Le premier compteur donne la mesure de l'air entrant, le deuxième la mesure de l'air total sortant, le troisième la même mesure moins l'acide carbonique.

L'oxygène s'obtient par différence entre le compteur de l'entrée et le deuxième compteur de l'air sortant.

Ce procédé, ainsi que le procédé suivant, possède l'avantage de donner, en outre, la mesure du débit respiratoire.

Méthode de Chauveau de la dérivation proportionnelle à l'orifice des narines, chez l'homme. — Appareil de Chauveau et Tissot. — Cette méthode présente l'avantage énorme de permettre l'expérimentation sans la moindre gêne pour le sujet, aussi bien à l'état de travail qu'à l'état de repos et de permettre au sujet d'effectuer un travail quelconque. Elle présente l'avantage non moins considérable de ne rien changer aux conditions physiologiques de la respiration; l'air garde la même composition du commencement à la fin de l'expérience.

L'appareil suivant permet de calculer avec la plus grande précision les coefficients respiratoires aussi bien en oxygène qu'en acide carbonique. Il est basé sur les deux principes suivants :

1° Si l'on fait passer la totalité de l'air expiré sortant par les narines (la bouche restant continuellement fermée) dans un système de deux tubes con-

(1) Pour plus de détails sur ce sujet, voy. : Laulanié, *Éléments de physiologie* ou *Archives de physiologie*, 1895.

centriques ouverts à leurs deux extrémités, il passe dans le plus petit de ces deux tubes une quantité d'air qui est dans un rapport constant avec la quantité totale d'air expiré (1);

2° Inversement, et connaissant ce rapport, on peut calculer facilement la valeur du débit respiratoire total, si l'on a recueilli et mesuré la portion d'air expiré qui a passé dans le tube intérieur.

Cet appareil (fig. 493) se compose d'un tube A, soudé à une petite caisse métallique D et portant deux tubes latéraux B et C. Un autre tube E, d'un calibre beaucoup plus faible que le premier, est placé dans l'axe de celui-ci et communique librement, d'une part avec l'extérieur, d'autre part avec la caisse D. C'est ce tube qui servira au passage de l'air dérivé pour les analyses et pour les mesures du débit respiratoire. Le tube B est ouvert et sert à l'entrée de l'air inspiré et à la sortie de l'air expiré. Dans le tube C est fixé un interrupteur décrit plus loin.

La caisse D porte un large tube latéral F dans lequel s'engaine un second tube G portant les parties suivantes :

1° Un électro-aimant H H';

2° Un système K K' K'' destiné à la fermeture de l'extrémité inférieure du tube E. Ce système est constitué de la manière suivante : il est formé de deux parties *a* et *b* (fig. 494), fixées sur l'axe *c* au moyen de deux petites tiges métalliques; *a* est une soupape constituée par une couronne métallique sur laquelle est fixée et tendue une lame de caoutchouc; *b* est une lame de fer doux très mince, qui sera attirée à chaque expiration par l'électro-aimant H. L'axe *c* est articulé sur la pièce *d* et cette dernière est fixée sur la masse de fer doux de l'électro-aimant par une couronne métallique *f*. La soupape *a* est

Fig. 493. — Appareil de Chauveau et Tissot, pour la mesure des coefficients et quotients respiratoires chez le sujet en état de travail ou de repos.

1) On verra plus loin que certaines conditions doivent être réunies pour que ce principe soit exact, lorsque la vitesse de l'air qui traverse les tubes est variable.

maintenue constamment relevée et appliquée contre l'extrémité inférieure du tube E par un ressort très fin I.

Enfin, un dernier tube L met en communication la caisse D avec un réservoir approprié, dans lequel on emmagasinera la portion dérivée de l'air expiré. La soupape K (fig. 493) ferme l'extrémité inférieure du tube E à chaque inspiration et s'abaisse pendant toute la durée de l'expiration. En un mot, elle s'élève ou s'abaisse exactement suivant le rythme des inspirations et expirations. Ce résultat est obtenu à l'aide de l'interrupteur placé dans le tube C (fig. 493) et qui rompt à chaque inspiration un courant de pile traversant l'électro-aimant H.

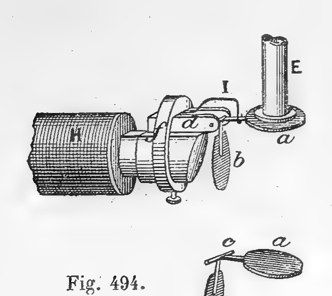


Fig. 494.

Cet interrupteur est formé de deux pièces d'ébonite a, b (fig. 493 et 495), renfermées dans le tube d; l'une d'elles a est traversée par deux tiges métalliques c, c, portant une borne à l'une de leurs extrémités et un godet métallique m, m' à l'autre. Ce godet a une profondeur de 6 à 7 millimètres et un diamètre de 2 millimètres; il contient du mercure jusqu'à un certain niveau qui est exactement le même dans l'autre godet. Le courant passe d'un godet à l'autre au moyen de deux petites pointes métalliques très fines n, n', soudées à une mince lame de clinquant g, fixée elle-même par la tige h à l'axe k. Cet axe est articulé sur les deux pièces l, l'; la lame g se soulève à chaque inspiration (les pointes n, n' quittent à ce moment le contact des ménisques de mercure) et s'abaisse au commencement de l'expiration (ou un peu avant). Mais pour qu'elle exécute bien ces mouvements, elle doit être d'une extrême légèreté et pouvoir être soulevée par un courant d'air d'une faible vitesse (1).

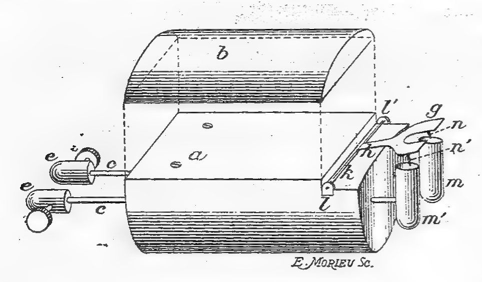


Fig. 495.

Toutes ces parties étant décrites, le fonctionnement de l'appareil est facile a comprendre. L'électro-aimant et l'interrupteur sont placés dans le circuit d'un courant de pile. La lame de clinquant g, abaissée sur les godets à mercure par son propre poids, ferme le circuit à l'état de repos. Dans cet état, la lame de fer doux K' est attirée par l'électro-aimant, et la soupape K laisse libre l'ouverture du tube de dérivation E (fig. 493). Lorsque l'inspiration s'effectue, la lame métallique g se soulève et rompt immédiatement le courant; la lame de fer doux K' abandonne l'électro-aimant et la sou-

(1) Cet interrupteur présente l'avantage de fonctionner aussi bien lorsque le sujet en expérience se déplace (marche, montée des escaliers, course) que lorsqu'il est au repos. Le mercure adhère tellement à la paroi métallique des godets que l'on peut retourner l'interrupteur sens dessus dessous sans que les ménisques changent de forme et sans que le mercure tombe.

pape K, attirée avec elle en sens inverse par la tension du ressort I, vient fermer l'ouverture du tube E, empêchant ainsi toute aspiration, vers le poumon, de l'air refoulé dans la caisse D et dans le réservoir qui lui fait suite. L'inspiration terminée, la lame *g* retombe par son propre poids sur les godets,

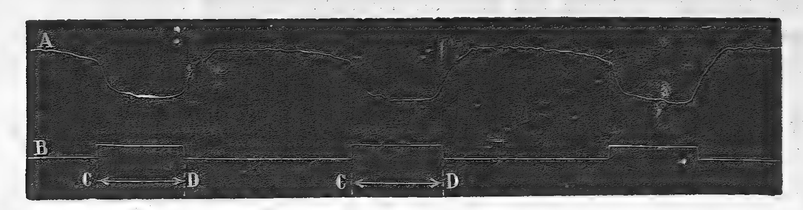


Fig. 496. — A, mouvements respiratoires; ils sont inscrits à l'aide d'un tambour à levier mis en communication avec l'intérieur du tube B (fig. 493). — B, mouvements de la soupape K; l'électro-aimant est remplacé par un signal de Desprez; les mouvements de la plume de ce signal correspondent donc exactement aux mouvements de la soupape K; la portion CD du tracé correspond à l'occlusion de l'orifice O (fig. 493).

ferme à nouveau le courant et détermine l'abaissement de la soupape K *un très court instant avant le commencement de l'expiration*; de sorte que l'orifice O se trouve libre *pendant la durée entière de l'expiration* et permet la dérivation, dans un réservoir approprié, d'une quantité déterminée d'air expiré.

D'après ce que je viens de dire, il y a donc sensiblement synchronisme

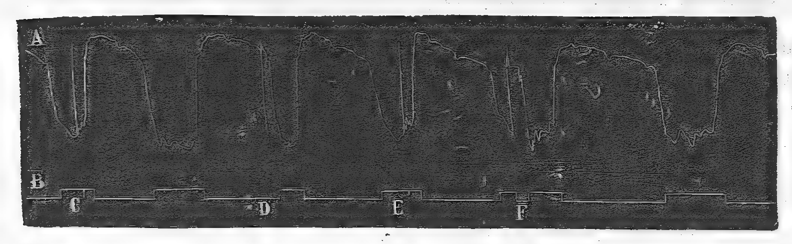


Fig. 497. — A, mouvements respiratoires; B, mouvements de la soupape; CDEF, repères naturels pris par arrêt du cylindre.

entre les mouvements de la soupape K et les mouvements respiratoires; il y a sur l'expiration une très légère avance du mouvement d'abaissement et sur l'inspiration un très léger retard du mouvement d'élévation. L'avance du mouvement d'abaissement est une condition qui favorise le bon fonctionnement de l'appareil. Quant au retard, il manque souvent; il ne se produit que lorsque le sujet mis en expérience a les mouvements respiratoires très lents et disparaît aussitôt que la respiration s'accélère. Mais, qu'il existe ou non, c'est sûrement une quantité négligeable, car il se produit à un moment où la vitesse du courant d'air est encore très faible, trop faible pour soulever la lame *g* de l'interrupteur (fig. 495).

Voici deux tracés qui montrent le synchronisme des mouvements de la soupape K avec les mouvements respiratoires. Ils ont été pris sur le même

sujet, le premier pendant l'état de repos (fig. 496), le second après un travail très faible (marche pendant une ou deux minutes) (fig. 497).

Ainsi donc, la soupape K (fig. 493) suit bien dans ses mouvements le rythme de la respiration; cette constatation était de la première importance, puisque la force qui met en mouvement cette soupape n'est pas empruntée directement à l'air qui sert à la respiration; et c'est ce dernier principe qui permet en grande partie à l'appareil de donner des indications exactes.

Je m'occuperai maintenant des conditions physiques dans lesquelles l'appareil fonctionne.

La quantité d'air qui a été dérivée par le tube E doit être dans un rapport constant avec la quantité totale d'air expirée, *quelle que soit la vitesse avec laquelle cet air est rejeté au dehors*. Ce résultat est obtenu lorsque l'air qui passe dans le tube E éprouve dans son mouvement de progression une résistance égale à celle de l'air qui sort librement au dehors par le tube B. Cette condition ne peut pas être remplie par l'appareil du premier abord. On n'y arrive qu'après une série de tâtonnements, en modifiant la longueur du tube E. A l'extrémité de ce tube est placé un ajoutage M, percé d'un orifice en mince paroi et d'un diamètre variable, suivant les circonstances. Cet ajoutage peut être enlevé à volonté et remplacé par un autre dont l'orifice est différent.

Il y a deux opérations successives à effectuer :

1° Chercher l'égalité du rapport $\frac{\text{air dérivé}}{\text{air total expiré}}$ pour *toutes les vitesses* d'écoulement de l'air dans l'appareil, l'orifice de dérivation restant le même ;

2° Cette égalité obtenue se maintient pour un orifice de dérivation d'un diamètre quelconque ; on cherche donc par tâtonnements le diamètre qu'il faut donner à l'orifice pour obtenir une dérivation convenable et appropriée à l'expérience que l'on se propose de faire ; cet orifice doit naturellement être d'autant plus étroit que l'expérience doit avoir une plus longue durée.

Première opération. — L'appareil est disposé comme pour une expérience, la vessie mise en place (1), etc. On détermine dans l'appareil l'écoulement d'une quantité déterminée d'air (20 litres) sous deux vitesses différentes, l'une assez faible, l'autre beaucoup plus forte (2). Avant de pénétrer dans l'appareil, l'air passe dans un compteur qui indique le volume total d'air écoulé. Je vais donner comme exemple trois séries de mesures effectuées avec l'un des premiers appareils que j'ai employés.

(1) Ce dispositif est décrit plus loin. Pour ces mesures, et à cause de la légère élasticité que présentent les vessies, et qui devient particulièrement apparente lorsque l'air en a été complètement extrait, il est nécessaire d'introduire au préalable une quantité d'air déterminée (faible) dont on tiendra compte dans la suite.

(2) L'écoulement de l'air est déterminé par un écoulement d'eau sous une pression donnée, dans un réservoir d'une capacité d'environ 30 litres ; la pression est celle d'une colonne d'eau de $0^m,35$ pour les faibles vitesses, et de $1^m,05$ pour les vitesses plus grandes.

PREMIÈRE SÉRIE.

	Volume d'air dérivé.	Volume total.
	lit.	lit.
Petite vitesse........................	0,438	20
Grande vitesse........................	0,369	20

Le débit de l'air dérivé étant plus considérable pour les faibles pressions, cela nous indique que l'orifice de dérivation est situé trop haut. Le tube E est donc raccourci une première fois.

DEUXIÈME SÉRIE.

	Volume d'air dérivé.	Volume total.
	lit.	lit.
Petite vitesse........................	0,377	20
Grande vitesse........................	0,356	20

Cette fois encore, l'orifice de dérivation est encore placé trop haut ; le tube E est raccourci une seconde fois.

TROISIÈME SÉRIE.

	Volume d'air dérivé.	Volume total.
	lit,	lit.
Petite vitesse........................	0,312	20
Grande vitesse........................	0,315	20

Je suis ainsi arrivé à une exactitude bien suffisante et que l'on peut difficilement dépasser; je me contenterai de cette approximation et je considérerai le débit dérivé comme étant sensiblement égal à la soixante-quatrième partie du débit total, quelle que soit la vitesse d'écoulement de l'air.

$$\left(\frac{20}{0,313} = \frac{64}{1}\right)$$

Deuxième opération. — Je suppose qu'on veuille obtenir un rapport voisin de $\frac{40}{1}$; on y arrive par les trois mesures suivantes :

	Volume dérivé.	Volume total.	Rapport.
	lit.	lit.	
Première mesure..................	0,314	20	$\frac{63,7}{1}$
L'orifice est agrandi.			
	Volume dérivé.	Volume total.	Rapport.
	lit.	lit.	
Deuxième mesure..................	0,348	20	$\frac{57,5}{1}$
L'orifice est encore agrandi.			
	Volume dérivé.	Volume total.	Rapport.
	lit.	lit.	
Troisième mesure..................	0,464	20	$\frac{43,1}{1}$

Ce dernier rapport est assez voisin du rapport cherché et l'on s'en contente.

Ainsi donc, pour toutes les vitesses d'écoulement de l'air, la quarante-troisième partie de l'air expiré sera dérivée dans la vessie ; connaissant le volume d'air dérivé, on aura donc facilement le débit respiratoire, et si l'on

a eu soin de prélever un échantillon de cet air pour l'analyser, on pourra connaître les quantités totales d'oxygène absorbées et d'acide carbonique exhalées par le sujet.

Il me reste encore à signaler quelques points très importants. — La vapeur d'eau peut se condenser à l'orifice de l'ajoutage M (fig. 493) et l'obstruer; de sorte que j'ai été obligé d'employer une pièce accessoire (fig. 498) qui peut servir comme dessiccateur ou comme condensateur; elle se compose d'une petite cuvette de verre A à laquelle est soudé un tube B, pénétrant dans l'intérieur jusqu'à environ 1 centimètre du couvercle C. Ce dernier est une plaque métallique traversée par deux tubes de verre D, D′ ouverts librement à leurs deux extrémités et plongeant dans la cuvette A jusque vers son milieu. Ce couvercle s'enlève à volonté et peut être fixé sur la cuvette à l'aide du manchon de caoutchouc E. Aux tubes D et D′ s'ajustent deux tubes de verre F, G, dont les extrémités H, H′ s'adaptent exactement aux narines du sujet. Un tube métallique K, fixé au tube B, permet d'ajuster le tout sur le tube A de l'appareil (fig. 493). On peut se servir de la cuvette comme condensateur; elle condense suffisamment de vapeur d'eau pour qu'on n'ait plus à craindre l'obstruction de l'orifice de dérivation; on peut aussi, pour plus de sûreté, y mettre des corps avides d'eau (acide phosphorique anhydre).

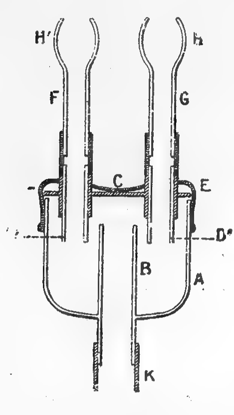


Fig. 498.

Un point des plus importants concerne le réservoir dans lequel on emmagasine l'air dérivé. Les résultats les meilleurs sont obtenus à l'aide de vessies ayant subi une préparation spéciale. Après leur extraction de l'animal, on les distend le plus possible et on les laisse sécher; lorsque la dessiccation est parfaite, on en amincit les parois et on les assouplit en les malaxant pendant très longtemps après les avoir imbibées d'huile; la vessie est au point convenable lorsque l'élasticité de ses parois a presque totalement disparu et qu'elle est devenue flasque comme une vessie fraîche.

Il y a un mode de préparation beaucoup plus convenable, mais aussi plus laborieux, et qui consiste à disséquer et à enlever complètement au préalable la tunique musculeuse. Lorsque la tunique muqueuse reste seule, on la distend avec précaution avec de l'air et on la laisse sécher. La dessiccation obtenue, on répand de l'huile à la surface et on malaxe la vessie avec précaution jusqu'au degré voulu. On obtient ainsi un sac d'une extrême minceur et qui présente une résistance nulle à la pénétration de l'air. Ce mode de préparation est extrêmement laborieux, surtout avec la vessie de certains animaux. La vessie du cheval est celle qui se prête le mieux à la préparation et qui donne les meilleurs résultats par la suite. Celle du porc est excellente aussi et présente, sur la précédente, l'avantage d'atteindre un volume plus considérable lorsqu'on l'a dilatée.

La seule objection qu'on puisse faire à cette manière de collecter l'air

expiré est que les parois minces de la vessie se prêtent à la diffusion de l'oxygène et de l'acide carbonique. Cette diffusion est déjà considérablement diminuée par l'imprégnation des parois avec de l'huile et, d'autre part, l'air enfermé dans la vessie n'y séjourne pas un temps suffisant pour que l'effet de la diffusion puisse se faire sentir. Les résultats obtenus jusqu'ici le montrent du reste parfaitement.

Pour terminer cette description, je parlerai du manuel opératoire concernant une expérience faite sur un sujet en état de travail, par exemple. Le condensateur est fixé sur l'appareil (fig. 493) et la vessie est ajustée au tube L ; au préalable, la vessie convenablement assouplie a été ajustée par le col à un tube de verre ou de métal terminé par un tube de caoutchouc de quelques centimètres et qui servira à adapter le tout au tube L de l'appareil (fig. 1) ; elle a été vidée totalement de son contenu d'air, puis on l'a laissée obéir au peu d'élasticité qui lui reste et qui détermine la rentrée d'une petite quantité d'air. Cette quantité d'air a été extraite et mesurée, puis réintroduite à nouveau dans la vessie. Je décrirai plus loin un procédé très simple, rapide et exact, pour faire cette mesure.

Lorsque l'air destiné à combattre l'élasticité de la vessie a été mesuré et réintroduit, on place une pince sur le tube de caoutchouc qui servira à relier la vessie à l'appareil et l'on adapte cette dernière au tube L. Puis on intercale l'interrupteur et l'électro-aimant dans le circuit d'un courant de pile ; au moment fixé, le sujet ajuste dans ses narines les deux tubes du condensateur, puis soutient l'appareil de sa main gauche par le tube L, et enfin prend la pile dans sa main droite (1) ; à ce moment, on lève la pince qui interrompt la communication avec la vessie et le sujet commence le travail à effectuer (marche ou travail du bras droit ; dans ce dernier cas, le corps du sujet est immobile et la pile placée sur une table, etc.), ou continue le travail déjà commencé (l'interruption du travail peut être très courte et de trois ou quatre secondes seulement, si l'opération est rapidement conduite). Lorsque la prise d'air ou le travail ont été jugés suffisants, le sujet s'arrête et la communication avec la vessie est à nouveau interrompue à l'aide d'une pince posée sur le tube de caoutchouc, puis on procède par des procédés convenables :

1° Au prélèvement d'un échantillon de l'air dérivé, pour l'analyse ;

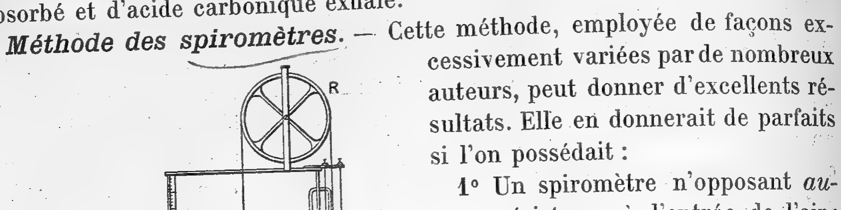
2° A la mesure du volume total dérivé.

Pour connaître le débit respiratoire total pendant le temps de l'expérience, il n'y a qu'à déduire du volume dérivé le volume introduit au préalable pour neutraliser l'élasticité de la vessie, puis à multiplier le résultat obtenu par le rapport de dérivation.

Il importe peu de connaître la quantité d'air qui reste dans la vessie, et qui se mélangera à l'air expiré, lorsqu'on veut seulement connaître les quotients et coefficients respiratoires ; ce mélange n'influe en rien sur la valeur des quotients respiratoires. Quant aux coefficients, ils seront calculés sur la quantité d'acide carbonique présente dans le volume d'air total que contient

(1) La pile est placée aussi dans quelques cas dans un sac que le sujet porte derrière son dos. On peut employer aussi une pile ou un accumulateur de poche.

la vessie, et sur la quantité d'oxygène manquant dans ce même volume; ces deux quantités, multipliées par le rapport de dérivation $\left(\frac{43}{1}\right.$ par exemple, comme je l'ai établi plus haut$\left.\right)$, donneront les quantités totales d'oxygène absorbé et d'acide carbonique exhalé.



Méthode des spiromètres. — Cette méthode, employée de façons excessivement variées par de nombreux auteurs, peut donner d'excellents résultats. Elle en donnerait de parfaits si l'on possédait :

1° Un spiromètre n'opposant *aucune* résistance à l'entrée de l'air; dans tous les spiromètres employés, la cloche est mal équilibrée et il arrive toujours un moment où l'air ne peut y pénétrer que s'il y est chassé sous une certaine pression qui devient une cause de gêne pour le sujet;

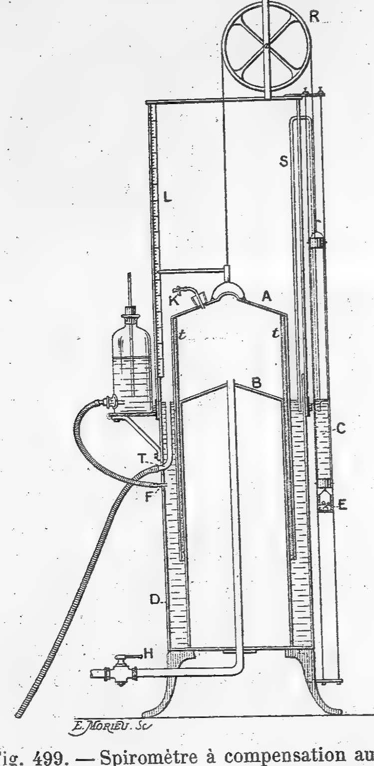


Fig. 499. — Spiromètre à compensation automatique, de J. Tissot. — F, tubes d'arrivée de l'eau; l'eau arrive par un robinet ou provient d'un vase de Mariotte disposé convenablement par rapport à l'orifice intérieur du tube T; T, tube de niveau; H, tube d'arrivée de l'air; E, godet de grenailles de plomb, destiné à équilibrer le système une fois pour toutes lorsque le système est amorcé; I, tubes creux destinés à augmenter le déplacement.

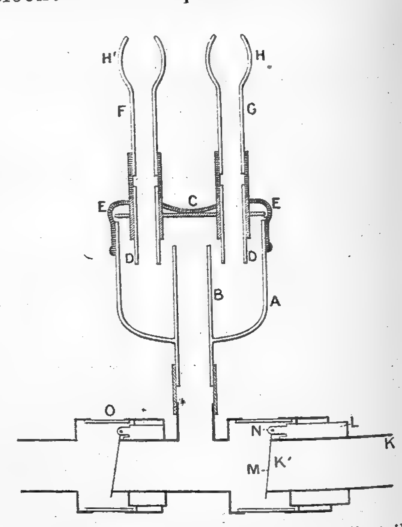


Fig. 500. — K, tube métallique mobile taillé en biseau à son extrémité K'; L, manchon métallique portant la soupape M; M, soupape métallique très mince en aluminium et montée délicatement sur l'axe N; O, manchon de verre permettant de vérifier le fonctionnement de la soupape; A, récipient de verre chargé de condenser en partie la vapeur d'eau; il porte les embouts FG, que le sujet ajuste dans ses narines. (Voy. la description de ce récipient page 752).

2° Un système de soupapes inspiratrices et expiratrices n'opposant aucune résistance au passage de l'air. Les soupapes de Müller sont encore trop résistantes.

Je ne décrirai ici qu'un seu appareil, parce qu'il remplit d'une façon parfaites les deux conditions énoncées plus haut.

Spiromètre. — C'est un gazomètre ordinaire (fig. 499) ; la cloche est en cuivre très mince (un dixième de millimètre d'épaisseur). Elle porte, soudés longitudinalement à son intérieur, deux tubes métalliques creux très légers et d'un diamètre assez fort, destinés à augmenter le déplacement d'eau, sans augmenter sensiblement le poids du gazomètre. La cloche est suspendue par une fine cordelette de soie ou d'acier qui s'enroule sur une poulie d'aluminium excessivement légère B, de grand diamètre et dont l'axe est monté très finement sur pointes. A l'autre extrémité de la cordelette est suspendu le contrepoids C. Ce contrepoids est constitué par un tube de verre cylindrique fermé à l'extrémité inférieure et dont la section intérieure s a *exactement* la même surface que la section s' de la portion métallique de la cloche. Un siphon S met en communication la cuve C avec le tube C. Si le siphon est amorcé, on voit que, la cloche A s'élevant d'une hauteur h, le tube C s'abaisse de h et le niveau de l'eau dans son intérieur monte de la même quantité h (la cuve D est à niveau constant). Or, comme $s = s'$, on a $sh = s'h$; donc l'augmentation de poids de la cloche, équivalente au poids d'un volume d'eau $s'h$, est exactement compensée dans le contrepoids par l'addition d'un volume d'eau équivalent sh. Le spiromètre est donc exactement équilibré pour toutes les positions de la cloche. Il est si bien équilibré qu'il est impossible, lorsqu'il est rempli d'air (le tube étant fermé), de constater dans cet air une pression de plus d'*un dixième de millimètre d'eau* (1).

On introduit dans la cloche, avant toute expérience, de l'huile de vaseline qui forme une couche à la surface de l'eau et empêche l'absorption des gaz par l'eau ou la rend négligeable. Le tube H est très large et n'oppose aucune résistance à l'entrée de l'air dans la cloche.

On place aussi près que possible du tube H le système de soupapes inspiratrice et expiratrice figuré ci-contre. Ce système, employé depuis longtemps par M. Chauveau, offre les particularités suivantes : 1° les deux soupapes sont entièrement métalliques (aluminium), excessivement légères et montées d'une façon très délicate qui leur assure la plus grande mobilité : le moindre souffle les met en jeu ; 2° ces soupapes viennent s'appliquer non pas sur une large surface comme dans les autres systèmes, mais seulement sur la section taillée en biseau d'un tube métallique. L'occlusion est parfaite quand le système est soigneusement construit et la soupape *ne colle jamais*, ce qui est l'écueil des autres systèmes. Les tubes étant mobiles les uns sur les autres, l'opérateur arrive facilement à assurer le jeu parfait des deux soupapes.

Le tube expirateur étant relié au spiromètre, le sujet introduit les embouts dans ses narines, et respire sans éprouver aucune gêne. Une fois l'expérience terminée, on place une pince sur le caoutchouc qui relie la soupape exploratrice au tube H et on fait une prise de gaz pour l'analyse par le tube K. Le volume d'air envoyé au spiromètre est lu sur la règle divisée L.

On a ainsi la connaissance exacte du débit et des coefficients respiratoires.

PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA CHALEUR

Par M. WEISS

Les notions de température et de quantité de chaleur, également importantes toutes deux, sont presque toujours liées l'une à l'autre dans l'étude de la chaleur. Mais dans un grand nombre de phénomènes, l'une d'elles prend une telle importance que l'autre peut être passée sous silence.

En effet, certains effets de la chaleur dépendent uniquement de la température; d'autres, au contraire, sont absolument liés à la quantité de chaleur mise en jeu.

Nous allons d'abord nous occuper des phénomènes dans lesquels la température est le principal facteur, puis nous passerons à ceux où les quantités de chaleur jouent le premier rôle.

Prenons un corps solide, la glace, par exemple, et chauffons cette glace; nous la verrons fondre et se transformer en eau. La fusion s'est produite à une température déterminée, quelle que soit la quantité de glace soumise à l'expérience, quelle que soit la quantité de chaleur employée; continuons à chauffer, si la température s'élève suffisamment, le liquide se mettra à bouillir. Cette ébullition, comme la fusion, aura lieu à une température fixe.

Voici donc deux phénomènes intéressants, passage d'un solide à l'état liquide, puis ébullition du liquide, pour lesquels le fait saillant est qu'ils se passent à une température déterminée. Remarquons que, dans le passage de l'état liquide à l'état gazeux, j'ai spécifié qu'il y avait ébullition. En effet, si la transformation de la glace en eau et, d'une façon générale, d'un solide en un liquide, se passe à une température fixe déterminée, il n'en est plus de même du passage de l'état liquide à l'état de vapeur. Ce passage ne se fait à une température fixe que lorsqu'il est accompagné d'ébullition. Prenons, par exemple, l'eau; cette eau à toute température émet de la vapeur et par conséquent se transforme en gaz. Quelle que soit la température ambiante, de l'eau placée dans un récipient s'évapore peu à peu, mais il n'y a pas ébullition.

Inversement, lorsque l'on refroidit un liquide, à une certaine température il passe à l'état solide. On constate que la température à laquelle un solide passe à l'état liquide est la même que celle à laquelle le liquide repasse par refroidissement à l'état solide. Ainsi, lors de la fusion de la glace pour donner de l'eau, la transformation se fait à zéro degré; inversement, l'eau se solidifie aussi à zéro pour donner de la glace.

Toutefois, cette constance du point de fusion et de solidification n'existe que si la pression à laquelle se fait le passage est la même. Dans la pratique, les variations de pression susceptibles de se produire n'ont qu'une influence insignifiante; il faut des pressions très considérables pour faire varier le point de fusion d'un corps. Suivant la nature de ce corps, une augmentation de pression élève ou abaisse le point de fusion. Prenez l'eau, par exemple : on sait que l'eau en se congelant augmente de volume; en effet, la densité de la glace est moindre que celle de l'eau, puisque la glace nage sur l'eau. Comme l'eau augmente de volume lors de son passage à l'état solide, on conçoit qu'une pression très considérable exercée sur cette eau retarde la congélation et nécessite un plus grand abaissement de température. L'expérience prouve qu'une pression de 33 atmosphères abaisse de 1 degré le point de solidification de l'eau. Si, au contraire, on expérimente sur la paraffine, c'est le contraire qui arrive, la paraffine diminuant de volume par la fusion. En effet, en faisant fondre de la paraffine dans une capsule, on voit les morceaux solides gagner le fond du liquide. On retrouve cette même influence de la pression dans le passage des liquides à l'état gazeux. Si l'on fait bouillir un même liquide dans une capsule, la température d'ébullition n'est fixe que pour une pression déterminée de l'atmosphère qui surmonte le liquide. Ainsi, l'eau bout à 100° centigrades, lorsque la pression gazeuse supportée par cette eau est de 760 millimètres de mercure. Puisque ce point d'ébullition dépend de la pression, on peut, en déterminant avec un thermomètre la température de l'eau bouillante, savoir quelle est la pression que l'eau supporte. C'est là le principe de ce que l'on nomme le thermomètre hypsométrique permettant de remplacer le baromètre.

Pour que l'ébullition de l'eau se produise aux températures indiquées dans les tables, il faut que l'eau ne contienne pas en dissolution de corps étrangers. On peut même, en faisant dissoudre dans l'eau divers sels, par exemple, obtenir des liquides ayant, sous la pression atmosphérique, des points d'ébullition supérieurs à 100 degrés.

Une solution concentrée de chlorure de potassium bout à 104°; pour le chlorure de sodium, la température monte à 108°; le carbonate de potasse bout à 135° et le chlorure de calcium à 179°. Il est donc facile, à l'aide de ces solutions, d'obtenir des bains à température fixe au-dessus de 100 degrés.

On peut aussi retarder l'ébullition de l'eau en maintenant la vapeur d'eau sous pression : plus la pression sera considérable, et plus élevée sera la température à laquelle l'eau entrera en ébullition.

Lorsque, à une température quelconque, on introduit un liquide dans un espace vide, le liquide se transforme en vapeur en plus ou moins grande quantité. Si on a introduit assez de liquide, il en restera une portion non transformée en gaz vapeur, et la vapeur se trouvant au contact de ce liquide est dite saturée. Cette vapeur exerce à la surface du liquide une pression analogue à celle que l'atmosphère exerce à la surface de la terre; elle a une valeur déterminée pour chaque liquide et chaque température, et est dite tension maxima de la vapeur à cette température. Considérons, par exemple, de l'eau à 100°; dans une capacité limitée, cette eau se transformera partielle-

ment en vapeur qui exercera, à la surface de l'eau qui subsiste, une pression égale à 760 millimètres de mercure. On dit que la tension maxima de l'eau à 100° est 760 millimètres. Voici quelle est la cause de cette dénomination. Si l'on cherche à comprimer la vapeur en laissant la température constante, au lieu de voir la pression s'élever, comme cela se produit avec les gaz suivant la loi de Mariotte, cette pression reste constante, une partie de la vapeur se transformant en liquide. Si, inversement, on augmente le volume gazeux, une certaine quantité de liquide passe à l'état de vapeur, la pression reste encore constante, tant qu'il reste du liquide en contact avec la vapeur. Par conséquent, une vapeur en contact avec le liquide qui l'a produite a une pression déterminée que l'on ne peut ni élever, ni abaisser, et qui ne dépend que de la température du liquide et de la vapeur. Une telle vapeur est dite vapeur saturée. Lorsque la température s'élève, toutes choses égales d'ailleurs, une certaine portion de liquide passe à l'état de vapeur, la tension maxima augmente. L'ébullition d'un liquide se produit lorsque la tension maxima de sa vapeur devient égale à la pression que l'atmosphère qui le surmonte, exerce à sa surface.

Les règles que nous venons d'indiquer semblent souffrir certaines exceptions dans le passage d'un état à l'autre. On peut conserver un liquide à une température inférieure à celle de sa solidification ou supérieure à celle de sa vaporisation, sans que la transformation se produise. Par exemple, en prenant de l'eau bien bouillie et la refroidissant avec certaines précautions, sans secousses, dans des récipients bien propres, on peut amener sa température au-dessous de zéro sans provoquer la formation de la glace : il y a ce qu'on appelle surfusion. Si par un procédé quelconque il se forme en un point du liquide une petite parcelle de glace, et le plus simple est d'y précipiter un petit fragment de ce corps, on voit aussitôt une assez grande portion du liquide se solidifier et la température s'élever jusqu'à zéro. De même, on peut conserver de l'eau au-dessus de 100° sans ébullition ; mais, si en un point du liquide, il se produit une bulle de vapeur, cette apparition est accompagnée d'une brusque transformation d'une partie du liquide en vapeur et la température descend à 100° en admettant que l'on soit à la pression de 760 millimètres.

Ces phénomènes sont exceptionnels et ne se reproduisent qu'avec beaucoup de précautions ; dans la pratique, il n'y a généralement pas lieu d'en tenir compte.

La transformation des liquides en vapeur n'a pas lieu seulement dans le vide. Chaque fois qu'un liquide est surmonté d'une masse gazeuse, cette masse gazeuse se sature de vapeur, cette vapeur se forme comme si le gaz n'existait pas. Si la quantité de liquide n'est pas suffisante, il se volatilise tout entier, et l'atmosphère gazeuse qui le surmonte est incomplètement saturée.

L'atmosphère terrestre contient, outre l'air, de la vapeur d'eau, mais, dans la plupart des cas, cet air n'est pas saturé. Par conséquent, la pression exercée dans l'atmosphère par la vapeur d'eau n'a pas la valeur maxima qu'elle pourrait avoir. On appelle état hygrométrique le rapport entre la tension réelle de la vapeur d'eau dans l'atmosphère et la tension qu'aurait cette vapeur d'eau si l'air était saturé.

Supposons que, dans certaines conditions de température, la tension maxima de la vapeur d'eau soit 20 millimètres, qu'en réalité à cette température la tension de la vapeur d'eau dans l'atmosphère ne soit que de 10 millimètres, l'état hygrométrique serait $\frac{10}{20}$, c'est-à-dire $\frac{1}{2}$. Un grand nombre d'appareils ont été imaginés pour mesurer l'état hygrométrique de l'air; nous renvoyons aux traités généraux pour trouver leur description.

Nous avons vu que la variation de température des corps pouvait produire des changements importants dans leur état physique. Il y a en outre des modifications moins visibles au premier abord, mais extrêmement importantes; elles se produisent sans qu'un corps cesse de rester à l'état solide, liquide ou gazeux. Considérons un corps solide ayant une longueur déterminée à 0 degré : si la température de ce corps vient à s'élever, sa longueur augmentera d'autant plus que la température croîtra davantage. La quantité dont l'unité de longueur de ce corps augmente par degré est ce que l'on appelle le coefficient de dilatation linéaire du corps. Prenons par exemple une règle en cuivre de 1 mètre de longueur : quand nous élevons sa température de 0 à 1°, sa longueur augmente de $0^m,000017$; on dira que $0^m,000017$ est le coefficient de dilatation linéaire du cuivre.

Par chaque degré d'augmentation de température, chaque mètre de cuivre augmenterait de $0^m,000017$. On peut par conséquent, connaissant la longueur d'un corps à 0 degré, déterminer cette même longueur à une température quelconque si l'on connaît le coefficient de dilatation du corps.

Il est évident qu'un corps solide augmentant de longueur dans toutes ses dimensions lorsque la température s'élève, le volume du corps augmente aussi. Chaque unité de volume du corps augmente par degré d'un certain volume que l'on nomme le coefficient de dilatation cubique du corps. Par exemple, 1 mètre cube de cuivre passant de 0 à 1 degré augmente de 0,000017 de son volume; on dira que 0,000017 est le coefficient de dilatation cubique du cuivre, et il rendra pour l'évaluation des volumes aux diverses températures le même service que le coefficient de dilatation linéaire pour l'évaluation des longueurs.

Les liquides se dilatent comme les solides ; seulement, dans ce cas, il ne peut, bien entendu, pas être question de dilatation linéaire ; c'est toujours la dilatation cubique qui est envisagée.

Quant aux gaz, il y a lieu de faire une autre distinction. On sait en effet l'influence considérable de la pression sur les volumes des gaz. Il peut arriver qu'un gaz se dilate en changeant de volume, sa pression restant constante. Le coefficient de dilatation cubique d'un gaz dans ces conditions a la même signification et la même définition que le coefficient de dilatation cubique des solides et des liquides. Mais il peut arriver qu'élevant la température d'un gaz on maintienne son volume constant; sa pression va alors en augmentant, et pour chaque degré d'élévation de température, chaque unité de pression augmente d'une certaine quantité que l'on appelle coefficient de dilatation sous volume constant.

Les méthodes employées pour déterminer le coefficient de dilatation des

divers corps solides, liquides ou gazeux, sont décrites dans les traités généraux. On y trouve aussi des tables donnant ces coefficients pour les corps vulgaires.

Ces variations de volume sont naturellement accompagnées de variations de densité : plus le volume augmente, plus la densité diminue, puisque le poids du corps reste le même.

Pour élever la température d'un corps, il faut lui communiquer une certaine quantité de chaleur. La quantité de chaleur nécessaire pour une même élévation de température croît avec le poids du corps soumis à l'expérience, c'est-à-dire qu'il faut dix fois plus de chaleur pour produire une élévation de température sur 10 kilogrammes d'une matière déterminée, que pour produire cette même élévation de température sur 1 kilogramme. De plus, la quantité de chaleur croît sensiblement proportionnellement à l'élévation de température. En réalité, pour faire varier la température d'un corps de 0° à 10°, il ne faut pas la même quantité de chaleur que pour la faire varier de 10° à 20°, mais les écarts sont très faibles, et, en général, on peut admettre qu'il faut une même quantité de chaleur pour produire une élévation de température de 1 degré d'un corps déterminé, quelle que soit la température initiale de ce corps. La nature de la substance soumise à l'expérience a aussi une influence considérable ; ainsi, il ne faut pas la même quantité de chaleur pour chauffer d'une même quantité un même poids d'eau ou d'un autre corps. La quantité de chaleur nécessaire pour élever 1 kilogramme de 0° à 1° est par convention l'unité de quantité de chaleur : cette unité porte le nom de calorie. Cependant lorsque les quantités de chaleur à évaluer sont faibles, on prend pour unité la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 0° à 1° un gramme d'eau. L'unité ainsi obtenue est mille fois plus petite que la précédente et porte le nom de petite calorie, par opposition à la première qui est la grande calorie. Une indication insuffisante peut souvent donner lieu à des erreurs.

La chaleur spécifique d'un corps est le nombre de calories nécessaires pour élever l'unité de poids de ce corps de 1°. Quand on connaît la capacité calorifique de ce corps et son poids, on peut calculer la quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température d'une quantité quelconque.

Les méthodes qui permettent de mesurer des chaleurs spécifiques et les tables qui donnent leur valeur pour les corps usuels se trouvent dans les traités généraux de physique.

Dans ce qui précède, nous avons admis que le corps ne change pas d'état, c'est-à-dire que, pendant l'élévation de température, il se maintient à l'état solide ou à l'état liquide. Si, dans le cours de l'opération, le solide vient à fondre ou si le liquide se vaporise, il se produit un phénomène important.

Supposons que nous prenions un corps solide et que nous lui fournissions de la chaleur : comme nous l'avons dit, la température du corps s'élèvera. A un moment donné, le corps commencera à fondre ; à partir de là, toute la chaleur que nous lui communiquerons ne servira nullement à élever sa température. Nous verrons, en effet, un thermomètre plongé dans le mélange du liquide et du solide se maintenir à un niveau constant, malgré l'apport incessant de chaleur qui n'aura d'autre effet que de faire fondre une

plus grande quantité du corps. Par conséquent, il faut une dépense de chaleur pour transformer un solide en liquide sans élévation de température. La quantité de chaleur nécessaire pour fondre 1 kilogramme d'un corps est ce que l'on appelle la chaleur latente de fusion de ce corps. Considérons, par exemple, la glace : cette glace maintenue à l'abri de toute source de chaleur subsiste indéfiniment à l'état solide. Pour en fondre 1 kilogramme et obtenir 1 kilogramme d'eau à 0 degré, il faut dépenser 80 calories, c'est-à-dire autant de chaleur que peut porter la température de 1 kilogramme d'eau de 0 à 80°.

Une fois la glace fondue et transformée en eau, continuons à chauffer : la température s'élèvera peu à peu, mais à 100°, si nous sommes à la pression 760, nous verrons apparaître l'ébullition. Des flots de vapeurs s'échapperont de la masse liquide, et un thermomètre qui y sera plongé indiquera que, malgré l'apport continuel de la chaleur, la température du liquide restera constante.

Toute la chaleur ainsi fournie servira à transformer le liquide en vapeur sans élévation de température. Pour transformer 1 kilogramme d'eau en 1 kilogramme de vapeur, il faut dépenser environ 500 calories, c'est-à-dire autant de chaleur que pour élever de 1 degré la température de 500 kilogrammes d'eau. Le nombre de calories nécessaires pour transformer 1 kilogramme de liquide en 1 kilogramme de vapeur se nomme chaleur latente de vaporisation de ce liquide.

Nous avons vu qu'à une température quelconque un liquide émettait de la vapeur ; cette transformation de liquide en vapeur exige une certaine dépense de chaleur. Si cette dépense ne peut se faire à l'aide d'une source extérieure, elle est empruntée au liquide lui-même qui se refroidit et dont la température peut s'abaisser ainsi bien au-dessous de la température ambiante. Pour que cet abaissement de température soit notable, il faut faciliter la vaporisation ; un des procédés employés consiste à renouveler les couches d'air en contact avec le liquide, de façon que ces couches d'air ne se saturent pas et puissent emprunter au liquide de nouvelles quantités de vapeur. C'est pour cela que l'on agite les couches d'air en contact avec un liquide dont on veut abaisser la température. Ce principe est facile à vérifier. Si on verse de l'éther à la surface du réservoir d'un thermomètre, cet éther se vaporisant, on voit la colonne du thermomètre s'abaisser. Cet abaissement sera beaucoup plus rapide si, après avoir versé l'éther sur le réservoir, on agite l'instrument dans l'air.

De même, un solide absorbant de la chaleur lors de sa fusion, si l'on vient à provoquer cette fusion sans apport de chaleur à l'aide d'une source extérieure, il en résultera un abaissement de température. Si on fait un mélange de glace pilée et de sel marin, la présence du sel provoque la fusion de la glace et la température du mélange s'abaisse au-dessous de 0 degré.

Nous avons vu, en étudiant le travail mécanique, que ce travail mécanique pouvait donner lieu à une apparition de force vive. Inversement, la force vive peut disparaître avec réapparition du travail mécanique. Dans ces deux transformations, il y a toujours équivalence entre le travail mécanique et la

force vive. Dans certains cas, cependant, il semble qu'il y ait disparition d'une plus ou moins grande quantité de travail mécanique ou de force vive sans compensation. Par exemple, un corps tombe d'une certaine hauteur sur le sol; après la chute, lorsque le corps est revenu au repos, qu'est devenu le travail mécanique dépensé par la descente du corps pesant? Ou bien encore, prenons un morceau de plomb, écrasons-le entre deux morceaux de fer; il faudra pour cela dépenser une assez grande quantité de travail et il n'apparaît pas de force vive. Les exemples que l'on pourrait citer de ces exceptions sont très fréquents; dans un grand nombre de cas, il y a disparition de travail mécanique et de force vive sans compensation apparente. Mais l'on sait maintenant que dans tous ces cas il y a production de chaleur. Pendant longtemps, on a considéré la chaleur comme ayant une existence matérielle. Sous le nom de calorique, on comprenait une substance impondérable qui, se portant d'un corps sur un autre, avait la propriété de communiquer de la chaleur au second aux dépens du premier. Avec cette conception, le calorique était indestructible; il ne pouvait non plus se créer, mais seulement se déplacer; sa quantité était fixe et déterminée. L'on sait aujourd'hui que la chaleur n'est qu'une des formes dans lesquelles peut se transformer l'énergie mécanique. Par disparition de travail mécanique ou de force vive, il peut apparaître de la chaleur, et, inversement, on peut, à l'aide de la chaleur, produire de l'énergie mécanique.

Prenons l'exemple signalé plus haut. Un morceau de plomb est écrasé entre deux morceaux de fer. Il y a une certaine quantité de travail mécanique, nécessaire à la déformation, qui disparaît; il n'apparaît pas de force vive. Mais si, après un écrasement énergique, l'on veut toucher le morceau de plomb, on constate immédiatement que sa température s'est élevée. De même, si un projectile animé d'une grande vitesse vient à heurter une paroi solide qui annule sa force vive, après le choc la température du corps s'est élevée d'autant plus que sa force vive était plus considérable. Signalons encore un fait qui se produit fort souvent. On cherche à déplacer un corps mobile sur un autre corps fixe, il y a frottement. Le corps mobile ne prend pas toute la vitesse qu'il devrait acquérir en tenant compte du travail mécanique dépensé; il y a donc un certain déchet. On sait que, dans ce cas, les corps qui frottent l'un contre l'autre s'échauffent d'autant plus que le frottement et le travail qu'il absorbe sont plus considérables. L'échauffement disparaît avec le frottement. Ainsi, un essieu mal graissé chauffe jusqu'à pouvoir produire la combustion de matières inflammables voisines; en même temps, la traction du véhicule relié à cet essieu nécessite une grande dépense de travail; il suffit de bien graisser pour donner un bon roulement et faire disparaître toute trace de chaleur. Nous citerons encore la compression et la détente des gaz. Un gaz maintenu dans un espace clos et comprimé s'échauffe, l'expérience du briquet à air montre que cette élévation de température peut aller jusqu'à provoquer l'inflammation de l'amadou. Ici encore il y a eu transformation de travail mécanique en chaleur, car pour comprimer le gaz il a fallu dépenser, par l'intermédiaire du piston sur lequel on agissait, une assez grande quantité de travail mécanique.

Inversement, supposons qu'un corps de pompe muni d'un piston contienne de l'air sous pression; en laissant le piston libre, il s'avancera sous l'influence de la pression de l'air. Il produira ainsi du travail mécanique que l'on pourra utiliser, et en même temps la température de l'air contenu dans le corps de pompe s'abaissera; c'est aux dépens de la chaleur contenue dans cet air que se sera produit le travail mécanique.

Il y a une relation fort simple entre ces apparitions et disparitions de travail et de chaleur. De nombreuses expériences ont fait voir que, quel que soit le mode de transformation opéré, il y avait équivalence entre une calorie et 425 kilogrammètres environ. C'est-à-dire que, dans le cas de disparition de chaleur avec apparition de travail mécanique, il faut une dépense de une calorie pour produire 425 kilogrammètres, et inversement, si tout travail mécanique dépensé ne produit pas assez de force vive, pour chaque kilogrammètre non compensé il apparaît 1/425 de calorie. Un grand nombre de déterminations ont permis d'arriver à ce résultat. Si les divers chiffres donnés ne sont pas absolument égaux, cela tient aux difficultés qui entourent ce genre de recherches; mais le principe en lui-même n'est plus discutable aujourd'hui. Le chiffre 425 est ce que l'on nomme l'équivalent mécanique de la chaleur, et les faits que nous venons d'exposer constituent ce que l'on appelle le premier principe de la thermodynamique.

Souvent, il semble qu'il y ait directement transformation de travail mécanique en chaleur ou inversement, sans aucun intermédiaire. Les cas que nous avons cités, par exemple, ne présentent pas de difficulté. On écrase du plomb ou on comprime un gaz : on voit disparaître le travail et apparaître la chaleur; il n'y a apparence d'aucune transformation intermédiaire. Mais il n'en est pas toujours ainsi.

Considérons une machine dynamo-électrique servant à l'éclairage. Cette machine dynamo-électrique est mise en mouvement par un moteur dépensant du travail. Aux lampes et en partie dans tous les fils, nous voyons apparaître de la chaleur; ici, il ne peut plus être question de transformation directe : nous savons, en effet, qu'il y a un intermédiaire qui est le courant électrique. Le moteur dépensant du travail a fait tourner la machine dynamo-électrique, cette machine produit un courant électrique, le courant électrique enfin cause l'incandescence de la lampe et les divers dégagements de chaleur. Nous ne pouvons plus dire qu'il y a eu transformation directe de travail en chaleur. On pourrait concevoir une série de transformations encore plus compliquées, ayant à leurs extrémités le travail mécanique et la chaleur.

Quelles que soient ces transformations, on peut affirmer que le principe de l'équivalence subsiste, c'est-à-dire qu'une calorie produite ou dépensée à une des extrémités de la chaîne correspond à 425 kilogrammètres absorbés ou produits à l'autre extrémité.

Le deuxième principe de la thermodynamique, ou principe de Carnot, relie les transformations de chaleur en travail mécanique ou inversement à la température à laquelle ces transformations s'accomplissent.

Quand on transforme du travail en chaleur, cette transformation peut tou-

jours être intégrale, c'est-à-dire que tout le travail peut être retrouvé sous forme de chaleur. Ainsi, dans le frottement des corps les uns sur les autres, leur compression ou toute autre action mécanique, finalement les corps étant revenus au repos, tout le travail mécanique dépensé peut être retrouvé sous forme de chaleur équivalente.

Il n'en est plus de même dans la transformation inverse. Dans une machine à vapeur, par exemple, toute la chaleur de la vapeur d'eau ne se retrouve pas dans le travail produit ; il y a toujours une fraction de cette chaleur qui passe au condenseur. D'une façon générale, quand on veut produire du travail mécanique à l'aide de la chaleur d'une façon continue, une fraction seulement de cette chaleur peut être transformée, le surplus tombant d'une température supérieure à une température inférieure.

Le principe de Carnot donne la quantité de chaleur qui peut être ainsi transformée dans les conditions les plus favorables ; il indique le coefficient économique maximum.

La formule à l'aide de laquelle ce coefficient économique est calculé est

$$\frac{q}{Q}=\frac{T_1-T_0}{T_1}$$

où Q représente la quantité de chaleur dont on dispose, q celle qui peut être transformée en travail. T_1 est la température absolue du corps avant la production de travail, T_0 sa température absolue après cette production de travail.

La température absolue d'un corps est sa température au-dessus de ce que l'on appelle le zéro absolu. Dans l'échelle centigrade, ce zéro absolu est à 273° au-dessous de la température de la glace fondante. Il n'y a pas lieu d'entrer ici dans des considérations sur la signification et l'origine du zéro absolu.

Prenons un exemple. Admettons que la vapeur d'une chaudière ait 150° avant d'avoir passé par le cylindre, et qu'elle tombe à 50° à sa sortie, nous aurons :

$$\frac{T_1-T_0}{T_1}=\frac{100}{423}=0,23$$

Par conséquent

$$q=Q.\ 0,23$$

On ne peut donc, dans ces conditions, transformer *au maximum* en travail que les 23 centièmes de la chaleur que la vapeur apporte au cylindre ; 77 centièmes tombent infailliblement au condenseur sous forme de chaleur.

THERMOMÉTRIE

Par M. GARIEL

---

1. — Nous éprouvons des sensations spéciales dites calorifiques qui varient suivant les conditions dans lesquelles nous nous trouvons : c'est ainsi que nous avons *chaud* quand nous nous exposons aux rayons du soleil en été, quand nous nous trouvons dans le voisinage d'un corps en combustion; nous avons *froid*, quand, en hiver, nous subissons l'action de l'air extérieur, quand nous nous approchons d'une masse de glace.

Les sensations que nous éprouvons ainsi ont une cause extérieure dépendant d'une manière d'être particulière du milieu ambiant, car des corps placés dans les mêmes conditions subissent des modifications variées suivant leur nature : par exemple la cire à modeler très dure, lorsqu'elle se trouve dans les conditions qui nous font éprouver la sensation de froid, se ramollit dans les conditions où nous éprouvons la sensation de chaleur. L'eau peut passer à l'état de glace solide dans les premières conditions, tandis que la glace fond dans les secondes.

Il est naturel d'attribuer ces divers effets à des variations dans l'état du milieu; ces variations consisteraient en ce que tantôt le milieu ambiant fournirait de la *chaleur* aux corps qui s'y trouvent plongés, et tantôt, au contraire, leur en enlèverait. On exprime cette idée en disant que le milieu peut être dans des *états calorifiques* variés.

Il est facile de concevoir, sans insister, qu'il est intéressant et utile de pouvoir distinguer ces états calorifiques, de pouvoir caractériser chacun d'eux.

On peut concevoir divers moyens d'atteindre ce résultat : par exemple, on pourrait définir un état calorifique déterminé en indiquant qu'il correspond à la fusion d'un certain corps solide, et l'on aurait ainsi autant d'états calorifiques bien caractérisés que nous connaissons de corps solides susceptibles de se liquéfier.

On peut convenir de caractériser un état calorifique par un numéro d'ordre : le numéro d'ordre qui définit ainsi un certain état calorifique est ce qu'on appelle la *température* du milieu.

2. — Il importe d'indiquer comment on peut arriver à établir ce numérotage.

L'expérience montre que, sauf de rares exceptions, un corps déterminé,

tant qu'il ne change pas d'état, présente un volume d'autant plus grand que le milieu dans lequel il se trouve nous fait éprouver une sensation de chaleur plus accentuée, et inversement; d'autre part, un même corps reprend toujours le même volume, toutes les fois qu'il est ramené à un même état calorifique défini comme nous l'avons indiqué plus haut.

De là, l'idée de caractériser un état calorifique d'un milieu par le volume qu'y prend un corps choisi conventionnellement et désigné sous le nom de *thermomètre.*

Comment a-t-on choisi le corps qui doit constituer le thermomètre et qu'on appelle la *substance thermométrique* ? et quelle relation a-t-on établie entre la valeur numérique de la température et le volume du thermomètre?

Une seule condition absolue est, en réalité, imposée à la substance thermométrique: c'est qu'une masse déterminée de cette substance ne prenne pas le même volume pour deux états calorifiques différents, car il y aurait alors ambiguïté sur la valeur de la température quand le thermomètre atteindrait ce volume. Cette condition doit faire rejeter l'eau, un grand nombre de solutions aqueuses et quelques rares corps qui présentent ce caractère (ces corps sont ceux qui possèdent un *maximum de densité*).

Il est aisé de concevoir que le thermomètre sera d'autant plus facile à observer que son changement de volume, que sa dilatation sera plus grande entre deux états calorifiques déterminés; on a donc été conduit à prendre un corps gazeux comme substance thermométrique, et, pour des raisons diverses, inutiles à développer, c'est l'hydrogène qui a été choisi.

En réalité, le thermomètre à hydrogène sert rarement dans la pratique; c'est un étalon, et, dans les usages journaliers, on fait usage d'appareils constitués par d'autres substances, comme nous l'expliquerons.

La relation à établir entre les variations de volume et les variations de la valeur numérique de la température est arbitraire: il suffirait qu'elle fût nettement définie. On a convenu que les variations de l'un et de l'autre seraient proportionnelles, ce qui revient à dire que lorsque le volume du thermomètre s'accroît de quantités égales, la température varie aussi de quantités égales (1).

(1) Si nous désignons par V, V′ et V″ les volumes du thermomètre pour trois états calorifiques dont les températures sont t, t' et t'', cette convention revient à écrire

$$\frac{V-V'}{V'-V''}=\frac{t-t'}{t'-t''}$$

ou, numériquement,

$$\frac{V-V'}{t-t'}=\frac{V'-V''}{t'-t''}$$

c'est-à-dire que le rapport de la variation de volume à la variation de température est constant.

Si on désigne cette constante par K, on a donc

$$\frac{V-V'}{t-t'}=K \qquad \text{ou} \qquad V-V'=K(t-t').$$

Il importe, d'autre part, de remarquer que la dilatation est proportionnelle au volume primitif: on peut donc écrire

$$V-V'=V'k(t-t') \qquad \text{ou} \qquad \frac{V-V'}{V'}=k(t-t').$$

La quantité k, constante, est ce qu'on appelle le *coefficient thermométrique.*

La proportionnalité que nous venons de rappeler montre que l'on eût obtenu la même

On définit alors la température en choisissant deux états calorifiques bien déterminés et se donnant à volonté les valeurs correspondantes de la température.

Le choix de ces états qu'on désigne sous le nom de *points fixes* et celui des températures correspondantes caractérisent ce qu'on appelle une *échelle thermométrique.*

3. — L'échelle universellement adoptée aujourd'hui, au moins au point de vue scientifique, est l'échelle dite *centigrade* ou *de Celsius.*

Elle est définie ainsi qu'il suit:

L'état calorifique qui détermine l'un des points fixes, le premier, est celui qui correspond à la fusion de la glace, et la température correspondante a été choisie pour le zéro, le point de départ de l'échelle centigrade.

L'état calorifique qui détermine le second point fixe est celui qui correspond à l'ébullition de l'eau se produisant sous la pression normale de 760 millimètres de mercure, et la température a été désignée par le nombre 100.

Entre ces deux états, le volume du thermomètre s'est augmenté d'une certaine quantité; d'après la convention que nous avons indiquée, chaque fois que ce volume variera de 1 centième de l'accroissement total, la valeur de la température s'accroîtra de 1 unité. Les nombres ainsi obtenus qui définissent les divers états calorifiques sont désignés sous le nom de *degrés centigrades.*

Nous pouvons alors donner les définitions suivantes:

Le degré centigrade est la variation de température qui produit dans une masse donnée d'hydrogène à pression constante une variation de volume qui est la centième partie de la variation que subit cette même masse exposée d'abord dans de la glace fondante, puis dans de l'eau bouillant sous la pression normale de 760 millimètres.

Il existe des états calorifiques pour lesquels le thermomètre prend un volume moindre que celui qu'il a dans la glace fondante. Pour caractériser ces états, on étend la convention précédente de telle sorte qu'une variation de 1 degré correspond à une même variation de volume. On a donc une seconde suite de nombres; pour les différencier des précédents, on convient de les faire précéder du signe — (1).

valeur de $t - t'$, si on avait opéré avec un autre volume v' qui serait devenu v, car on aurait eu :

$$\frac{v - v'}{v'} = \frac{V - V'}{V'}.$$

Les évaluations de température sont donc indépendantes de la masse de la substance thermométrique en expérience.

(1) Si nous désignons par V_0 le volume qui correspond au premier point fixe dont la température est alors égale à 0°, par V_{100} le volume correspondant au deuxième point fixe dont la température est 100, la formule générale précédente peut s'écrire

$$\frac{V - V_0}{V_{100} - V_0} = \frac{t}{100}$$

équation qui donne t lorsqu'on connaît V, V_0 et V_{100}.

On voit que si $V < V_0$, cette formule donne $t < 0$, ce qui justifie la convention faite sur le signe des températures correspondantes.

Il n'est pas sans intérêt d'insister sur le fait que la relation adoptée entre les variations de volume et de température n'est point nécessaire et qu'elle aurait pu être remplacée par une autre relation quelconque (1).

Il a existé d'autres échelles que l'échelle centigrade ; il en subsiste encore deux qui doivent être connues, quoiqu'elles soient beaucoup moins employées.

L'échelle Réaumur est définie par les mêmes points fixes ; la température de la glace fondante, premier point fixe, est 0° ; celle de l'eau bouillante est prise égale à 80 degrés.

Dans l'échelle Fahrenheit, le second point fixe correspond aussi à l'ébullition de l'eau, et sa température a été prise égale à 212° ; mais le premier point fixe, dont la température est 0°, correspond à l'état calorifique d'un mélange de sel marin et de glace pilée.

Il est utile de pouvoir comparer les indications de températures fournies dans ces divers systèmes. La comparaison se fait très facilement entre l'échelle Réaumur et l'échelle centigrade qui ont les mêmes points fixes. Comme l'étendue comprise entre ces points est divisée en 80 degrés dans la première, et 100 dans la seconde, on reconnaît aisément que 4 degrés Réaumur occupent le même espace que 5 degrés centigrades.

Si donc T_R et T_C sont les températures d'un même milieu indiquées respectivement en degrés Réaumur et en degrés centigrades, on a immédiatement :

$$T_C = \frac{5}{4} T_R \text{ ou encore } T_C = 1{,}25\ T_R.$$

Les indications qui caractérisent l'échelle Fahrenheit ne sont pas suffisantes pour permettre la comparaison, puisqu'elle n'a qu'un point fixe commun avec les autres échelles. Mais l'expérience a montré qu'un thermomètre Fahrenheit plongé dans la glace fondante marque 32° : entre ce point et celui de l'eau bouillante, il y a donc $212 - 32 = 180$ degrés Fahrenheit. Ce même intervalle correspondant à 100 degrés centigrades, on voit que 180 degrés Fahrenheit occupent le même espace que 100 degrés centigrades ou 9 degrés F. que 5 degrés C. On en conclut que 1 degré F vaut $\frac{5}{9}$ de degré C. Cette valeur suffit pour transformer un nombre de degrés d'une échelle dans l'autre ; mais pour transformer une température, il faut tenir compte de ce que le point de départ n'est pas le même pour les deux échelles.

Soient T_F et T_C les températures d'un milieu évaluées respectivement à l'aide des échelles Fahrenheit et centigrade. Au-dessus de la glace fondante,

(1) Par exemple, on aurait pu convenir que la variation de température correspondant à 1°, au lieu d'être une fraction déterminée du volume *primitif* du thermomètre, aurait été une fraction constante du volume *actuel* du thermomètre.

On peut reconnaître aisément que la relation entre le volume et la température serait de la forme $V = V_0 e^{kt}$. Les volumes correspondants aux divers degrés de l'échelle seraient obtenus en intercalant 99 moyens géométriques entre V_0 et V_{100}, tandis que dans la convention adoptée on intercale des moyens arithmétiques.

il y a T_C degrés C. et seulement T_F — 32 degrés F. C'est à ces nombres qu'il faut appliquer la relation précédemment indiquée; on aura donc:

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32).$$

Une transformation analogue se ferait pour l'échelle Réaumur; il est inutile de nous y arrêter.

Il est facile de construire un tableau graphique qui donne immédiatement par une simple lecture le résultat de ces transformations.

4. — Lorsqu'un corps, qui n'est le siège d'aucun phénomène particulier (changement d'état, actions chimiques, etc.), introduit dans un milieu, ne change pas de volume, on dit qu'il est à la même température que ce milieu, que sa température est celle du milieu même. Cette condition signifie que le corps ne reçoit pas de chaleur du milieu, et qu'il n'en fournit pas à celui-ci, ou que, s'il y a échange, la quantité de chaleur qu'il reçoit est égale à celle qu'il fournit.

Si le corps introduit dans le milieu diminue de volume, c'est qu'il fournit de la chaleur au milieu. On dit que sa température est supérieure à celle du milieu parce qu'il aurait été en équilibre de température avec un certain autre milieu dont la température serait supérieure à celle du premier.

Inversement, si le corps avait augmenté de volume, on aurait dit, pour une raison analogue, que sa température était inférieure à celle du milieu.

L'expérience vérifie que, si deux corps ayant la même température sont mis en contact, leurs volumes ne changent pas, tandis que, s'ils ne sont pas à la même température, le volume de l'un augmente, et le volume de l'autre diminue.

Comme les changements de volume d'un corps sont liés au gain ou à la perte de chaleur qu'il fait, on en conclut que la condition nécessaire, pour qu'il y ait passage de la chaleur d'un corps à un milieu ou d'un corps à un autre corps, c'est que la température du premier corps soit différente de celle du second corps ou de celle du milieu (toutes réserves faites pour le cas où ces corps seraient le siège de phénomènes d'autre nature).

On pourrait arriver à définir la température autrement, par exemple en définissant la température d'un corps par son volume et en concluant la température des milieux ; mais il nous semble, à divers points de vue, qu'il y a avantage à suivre l'ordre des idées que nous avons indiquées.

5. — Dans les expériences pour lesquelles l'évaluation des températures doit être faite avec une très grande précision, on peut employer effectivement des thermomètres à hydrogène; dans la plupart des cas, on peut sans inconvénient remplacer l'hydrogène par l'air. Mais le plus souvent on n'utilise pas les thermomètres à gaz, qui sont d'un maniement délicat et qui donnent une approximation plus grande que celle qui est pratiquement nécessaire. Presque toujours, on les remplace par des thermomètres à liquide : une masse déterminée de liquide est enfermée dans un vase divisé en parties d'égale capacité, et on note le nombre des divisions occupées par le liquide;

quand la température varie, le vase se dilate comme le liquide, mais sa dilatation est moindre, de telle sorte que le nombre des divisions occupées par le liquide augmente quand la température s'élève.

On n'observe pas dès lors la dilatation *absolue* du liquide, c'est-à-dire les variations de son volume, mais sa dilatation *apparente*, c'est-à-dire l'excès de la variation de son volume sur la variation de volume du vase.

En étudiant la question, on reconnaît aisément que si le liquide et la matière qui constitue le vase suivaient la même loi de dilatation que l'hydrogène, un thermomètre à liquide, dont les indications coïncideraient avec celles du thermomètre à hydrogène pour la glace fondante et pour l'eau bouillante, serait également en coïncidence absolue pour toutes les températures intermédiaires.

Mais il n'en est rien, et chaque substance suit une loi particulière de dilatation : les thermomètres construits avec divers liquides et avec des verres différents ne donnent donc pas des indications concordantes avec celles du thermomètre à hydrogène, ni concordantes entre elles ; mais les différences ne sont pas considérables, et on peut les négliger dans la plupart des cas de la pratique et en particulier pour les applications médicales et physiologiques.

Les liquides employés dans la construction des thermomètres sont l'alcool et le mercure, mais le dernier corps seul doit être employé dès qu'on veut obtenir des mesures présentant quelque précision.

L'évaluation de la température est donnée par la variation de volume du liquide, mais celle-ci est appréciée par la variation de son niveau : il y a donc intérêt à ce que, pour une variation de volume déterminée, le déplacement du niveau soit le plus grand possible, c'est-à-dire que le liquide doit être contenu dans un vase de petite section : on emploie un tube cylindrique de manière que, la section étant partout la même, des variations égales de volume, qui correspondent à des variations égales de température, soient représentées par des longueurs égales : ce tube est appelé la *tige* du thermomètre.

D'autre part, la facilité d'évaluation sera d'autant plus grande que par une même variation de température la dilatation sera plus considérable. Il y a donc intérêt à ce point de vue à prendre une grande masse de liquide ; pour que l'appareil ne présente pas une trop grande longueur, on ne lui conserve la forme d'un cylindre de petite section que pour la partie où le niveau du liquide peut effectivement se déplacer, et on adapte à ce cylindre un réservoir sphérique ou un réservoir cylindrique de section beaucoup plus grande que celle de la tige.

La forme connue des thermomètres trouve ainsi une explication toute naturelle.

Il serait sans intérêt de décrire le mode de construction d'un thermomètre et d'indiquer les précautions à prendre.

Nous ne nous arrêterons pas davantage à la graduation : le thermomètre, après qu'on y a introduit du mercure et qu'on a fermé la tige à la lampe, est introduit successivement dans la glace fondante et dans l'eau bouillante.

Aux points où s'arrête le mercure dans ces deux conditions, on marque respectivement 0° et 100°. (Si, pour ce dernier point, l'opération était faite à une pression différente de 760 millimètres, il y aurait lieu d'apporter une correction.)

A l'aide d'une machine à diviser, on divise en 100 parties d'égale longueur l'intervalle compris entre les points ainsi obtenus, et l'on prolonge les divisions de part et d'autre de ces points.

Pour les applications à la physiologie et à la clinique, on n'emploie qu'une partie de l'échelle thermométrique qui ne s'étend ni jusqu'au 0°, ni jusqu'au point 100°. Il y a intérêt, au point de vue pratique, à restreindre la longueur de la tige à la partie utile, c'est-à-dire à l'espace compris environ entre 25 et 50°. On ne peut graduer directement un thermomètre ainsi construit, puisqu'il ne s'étend pas jusqu'aux points fixes ; la graduation se fait alors *par comparaison* : on met le thermomètre à graduer en même temps qu'un thermomètre étalon préalablement divisé dans un bain liquide que l'on porte successivement à deux températures différentes; on marque un trait aux points où s'arrête le mercure, et on y inscrit la température indiquée par le thermomètre étalon; puis on divise l'intervalle compris entre ces traits en autant de parties égales qu'il y a d'unités dans le nombre qui représente la différence entre les deux températures observées.

6. — Il est nécessaire de vérifier la graduation d'un thermomètre de temps en temps. L'expérience montre, en effet, que le verre qui constitue le réservoir subit une lente modification moléculaire qui diminue sa capacité ; aussi, lorsqu'on vient à plonger un thermomètre dans la glace fondante un certain temps après qu'il a été construit, on reconnaît que le mercure s'élève au-dessus du point où avait d'abord été marqué le zéro ; il en résulte que toutes les températures indiquées sont erronées, et qu'il faut les corriger en y ajoutant un nombre égal à celui qui mesure le déplacement du zéro, déplacement qui dépend de la nature du verre, et qui peut atteindre 2 degrés.

En répétant cette observation, on reconnaît que le déplacement atteint une valeur sensiblement fixe au bout d'un certain temps, à partir duquel il est inutile de répéter la comparaison. En réalité, il n'en est pas absolument ainsi et le zéro se déplace chaque fois que le thermomètre est soumis d'une manière prolongée à une température très basse ou très élevée; mais les déplacements sont faibles et peuvent être négligés toutes les fois qu'il n'est pas nécessaire de faire des mesures d'une extrême précision.

Pour les thermomètres médicaux dont l'échelle ne contient pas le 0°, on ne peut pas faire directement la vérification, ni déterminer la valeur de la correction qu'il faut apporter à la lecture des températures : on peut faire cette détermination par une comparaison avec un thermomètre étalon dont on a vérifié le zéro.

On a cherché à éviter la sujétion de cette comparaison en construisant des thermomètres médicaux dont le zéro se trouve sur la tige, quoique celle-ci soit de longueur restreinte. A cet effet, on a intercalé sur la tige un réservoir au-dessous du niveau de la température minima qu'on veut utiliser, et la tige reprend entre ce réservoir accessoire et le réservoir principal : les

dimensions ont été calculées de telle sorte que le zéro du thermomètre se trouve dans cette seconde partie de la tige. Lorsqu'on veut vérifier le thermomètre, on le place dans la glace fondante, et l'on s'assure si le mercure s'arrête au niveau du zéro ; s'il n'en est pas ainsi, on lit, sur les divisions qui existent dans le voisinage du zéro, la valeur de la correction qu'il faudra appliquer aux températures lues sur la tige. Les indications intéressant la clinique notamment devant être appréciées à moins d'un demi-degré, il est absolument nécessaire de faire de temps en temps cette vérification, puisque le déplacement du zéro peut atteindre et même dépasser cette valeur.

Nous avons indiqué les conditions qui permettent d'évaluer aisément de faibles variations de température, c'est-à-dire qui assurent la sensibilité du thermomètre : ce sont la faible section de la tige et la grande capacité du réservoir. On arrive ainsi à avoir des divisions correspondant aux degrés qui sont largement espacées, ce qui facilite l'appréciation des fractions de degré, mais ce qui a l'inconvénient d'allonger la tige. Cet inconvénient est surtout sensible pour les thermomètres médicaux qui, non seulement, sont moins facilement transportables, mais qui sont d'un usage peu commode.

D'autre part, les grandes dimensions du réservoir ont un autre inconvénient : le thermomètre se met d'autant moins rapidement en équilibre de température que la masse de mercure contenue dans le réservoir est plus considérable; il faut plus de temps pour que le niveau du mercure atteigne une position fixe. La durée des observations peut ainsi être accrue de manière à devenir gênante.

Ajoutons que, au point de vue des applications à la clinique, le réservoir ne doit pas avoir un trop grand diamètre pour pouvoir être placé facilement ou introduit dans les cavités dont on veut déterminer la température. Les thermomètres médicaux devront donc avoir des réservoirs de dimensions restreintes ; mais alors, pour que la sensibilité ne soit pas trop diminuée, on est conduit à donner au vide de la tige une très petite section. La colonne mercurielle, ainsi très réduite, devient difficilement visible, et il faut parer à ce nouvel inconvénient.

On peut employer le procédé général qui permet de voir les objets de petites dimensions, c'est-à-dire qu'on peut regarder la colonne mercurielle avec une loupe ; mais la nécessité de joindre cet appareil au thermomètre est une sujétion qu'il est préférable d'éviter.

On y est arrivé en donnant à la tige une forme extérieure différant de la forme circulaire, et présentant d'un côté une épaisseur et une courbure telles, que cette partie joue le rôle d'une loupe cylindrique (analogue à la loupe dite de Stanhope) qui fait voir la colonne élargie, et permet d'apprécier aisément la position de sa surface terminale.

Fig. 501.

Enfin, on peut encore remplacer la section circulaire du vide de la tige par une section de très petite surface, mais présentant une forme ellipsoïdale très aplatie; la colonne est d'autant moins visible lorsqu'on la regarde dans la direction du grand axe de cette section, mais elle est au contraire plus facile à percevoir dans une direction perpendiculaire. Les divisions sont tracées sur la tige de manière à être vues lorsqu'on regarde le thermomètre dans cette dernière direction.

7. — La lecture de la température, peu facile par suite de la faible largeur de la colonne mercurielle, est souvent rendue plus difficile encore par la position occupée par le thermomètre, par le mauvais éclairage; c'est le plus souvent le cas dans les applications du thermomètre à la clinique. Aussi emploie-t-on le plus souvent une disposition qui permet de faire cette lecture après que le thermomètre a été retiré de la position qu'il occupait, sans que le déplacement ait fait varier la position de la colonne liquide.

Le procédé le plus ordinairement employé pour obtenir ce résultat dans les thermomètres médicaux consiste à employer une colonne mercurielle qui soit discontinue dans la tige. Avant de faire une observation, on secoue assez fortement le thermomètre en lui faisant décrire un arc de cercle à bout de bras, l'appareil étant tenu à la main par l'extrémité supérieure de la tige. Par suite de l'action centrifuge, la partie séparée du mercure dans la tige arrive au contact de la partie inférieure; mais, à cause de la capillarité, les deux colonnes ne se réunissent pas. Lorsque le thermomètre est en place et que sa température s'élève, le mercure du réservoir en se dilatant pousse devant lui la colonne séparée, et l'effet continue tant que la température s'élève. Lorsque, ensuite, on retire le thermomètre, le réservoir arrive au contact de l'air ambiant : la température du mercure qu'il contient s'abaisse et l'extrémité de la colonne mercurielle se rapproche du réservoir. Mais ce mouvement de retrait n'entraîne pas la partie séparée de la colonne, parce que, comme nous l'avons dit, il y avait seulement contiguïté et non continuité entre les deux colonnes. La partie séparée reste donc à la position qu'elle avait atteinte, la position de son extrémité supérieure sur l'échelle divisée donne la température qui avait été atteinte, et cette indication subsistera tant que, par une secousse, comme précédemment, on n'aura pas ramené les colonnes au contact.

En principe, tout thermomètre à maximum pourrait être utilisé dans le cas que nous venons d'indiquer; mais les dispositions adoptées pour la plupart de ces appareils ne sont pas utilisables dans les thermomètres médicaux.

8. — En réalité, les indications fournies par le thermomètre à mercure ne sont pas rigoureusement exactes, comme nous l'avons dit, ce qui tient à ce que ni le mercure ni le verre ne suivent la même loi de dilatation que l'hydrogène.

On peut toutefois se servir du thermomètre à mercure pour faire des déterminations très exactes, à la condition d'avoir fait une comparaison directe entre celui-ci et un thermomètre à hydrogène. On plonge l'un et l'autre dans le même milieu qu'on porte à des températures différentes, et on note les valeurs indiquées simultanément par les deux appareils : on sait d'ailleurs que

dans la glace fondante et dans l'eau bouillante, le thermomètre à hydrogène et le thermomètre à mercure (après correction faite du déplacement du zéro, s'il y a lieu) marquent les mêmes températures, 0° et 100°. On peut alors construire soit une table numérique, soit mieux un tableau graphique qui représente la marche du thermomètre.

A cet effet, sur un papier quadrillé dont chaque division correspond à 1 degré, on porte la température indiquée par le thermomètre à hydrogène en abscisse, sur l'axe horizontal, et on prend sur la verticale de ce point une ordonnée dont la longueur évaluée sur l'axe vertical représente la température lue sur le thermomètre à mercure : l'extrémité de cette ordonnée représente un point de la courbe ; on a ainsi autant de points qu'on a fait d'observations et, de plus, on a les points qui correspondent aux températures 0° — 0° et 100° — 100°. On réunit alors les points obtenus par un trait continu qui fait connaître la marche du thermomètre.

Lorsqu'on fait une observation avec le thermomètre à mercure, on cherche sur l'axe vertical la division correspondant au nombre obtenu, on détermine le point de la courbe qui se trouve sur l'horizontale passant par cette division, et l'abscisse de ce point, lue sur l'axe horizontal, donne la véritable température.

Bien entendu, s'il ne s'agit que des applications médicales, il est inutile de construire la courbe dans toute son étendue, et on la restreint à la partie utile, entre 25° et 50° environ.

Si les indications des deux thermomètres étaient concordantes, la courbe serait une ligne droite, celle qui joint le point 0° — 0° au point 100 — 100. La quantité dont la courbe s'éloigne de cette droite fait connaître les erreurs dues à la loi particulière de dilatation du mercure et du verre. L'expérience montre que, comme on pouvait le prévoir, ces erreurs varient avec la nature du verre : entre 0° et 100° l'erreur ne dépasse pas 0°,05 pour le verre dur ; elle est plus grande pour le cristal dur et peut atteindre le triple de cette valeur pour le cristal ordinaire.

Ces résultats montrent que les différences entre les températures vraies et celles indiquées par un thermomètre en verre dur peuvent être négligées au point de vue des applications médicales.

9. — L'observation montre que chez un animal ou chez un homme la température des différentes parties n'est pas absolument la même : la température dans la cavité buccale, par exemple, n'est pas égale à la température de la peau, et celle-ci même varie d'un point à un autre du corps.

Lors donc que l'on veut utiliser les indications fournies par la température, il faut avoir soin de se placer dans des conditions bien déterminées qui soient toujours les mêmes.

On comprend, d'après ce que nous venons de dire, qu'on ne prendra pas la température de la peau. Ajoutons d'ailleurs que la détermination de cette température est difficile ; le réservoir du thermomètre ne peut toucher la peau que par une partie de sa surface, tandis que l'autre reste au contact de l'air ; il faut l'en protéger par de la ouate, par exemple, et encore n'obtient-on pas aisément des résultats comparables. On a bien cherché à construire

des thermomètres de surface; mais, outre qu'ils ne sont pas complètement satisfaisants, il est inutile de nous y arrêter; ce n'est que dans des cas absolument exceptionnels qu'il peut être utile de connaître la température d'une partie limitée de la peau; celle-ci ne nous renseigne pas sur la température de l'individu.

On obtient au contraire des résultats ayant une signification réelle en introduisant le réservoir du thermomètre dans le rectum: il est au contact avec les tissus par toute sa périphérie, et il est complètement soustrait à toute influence extérieure. Mais il faut reconnaître que le mode opératoire est désagréable pour le patient; aussi y a-t-on rarement recours, excepté chez les enfants chez lesquels il nous paraît être le procédé de choix.

On peut également déterminer la température buccale qui est également caractéristique de l'état de l'individu observé. Toutefois, il convient d'opérer avec soin : il ne faut pas, en effet, que pendant l'opération le sujet respire par la bouche. Le courant d'air qui se produirait, agissant sur le réservoir mouillé par la salive, provoquerait une évaporation de ce liquide et par suite une absorption de chaleur, de telle sorte que la température indiquée par le thermomètre serait inférieure à la température réelle.

Ce procédé, qui peut être employé, par exemple, dans une série d'expériences sur un même sujet habitué à cette opération, nous paraît beaucoup moins satisfaisant au lit du malade et nous ne pensons pas qu'on doive y avoir recours dans la pratique.

C'est la température axillaire que l'on détermine le plus souvent; c'est celle à laquelle on a recours dans les observations où une indication contraire n'est pas fournie. Le réservoir du thermomètre est placé dans le creux de l'aisselle et on invite le sujet à appliquer fortement le bras contre le thorax. On crée ainsi, pour ainsi dire, une cavité artificielle dans laquelle le réservoir, en contact avec les tissus par toute sa surface, est complètement à l'abri de l'air; d'autre part, le fait que cette cavité est presque close empêche l'action refroidissante de l'air extérieur et surtout empêche l'évaporation à la surface de la peau, évaporation qui est également une cause de refroidissement.

La température axillaire est inférieure de 0°,2 ou 0°,3 à celle de la cavité buccale et de 0°,5 à 0°,7 à celle de la cavité rectale. Mais l'une de ces températures ne peut être considérée plus que les autres comme représentant la température de l'individu: ce qui est nécessaire, c'est d'avoir un élément thermique qui soit toujours comparable à lui-même, qui soit toujours pris, par conséquent, dans les mêmes conditions, bien déterminées et faciles à reproduire, ce qui est bien le cas de la température axillaire et ce qui explique que c'est à elle qu'on a le plus souvent recours.

Malgré la petite masse du mercure du thermomètre et à cause de la faible conductibilité du verre, le thermomètre ne se met pas immédiatement en équilibre de température avec les parois du creux axillaire; il convient donc de temps en temps de noter la position de l'extrémité de la colonne et de ne faire la lecture de la température que lorsque plusieurs observations successives ont donné les mêmes nombres. Le temps nécessaire pour atteindre ce

résultat n'est pas fixe ; mais, d'une manière générale, on peut dire qu'il est de dix minutes environ.

10. — Les forces thermo-électromotrices donnent naissance à des courants qui peuvent être utilisés pour la mesure des températures ou plutôt pour la mesure des différences de température. On sait, en effet, que lorsque deux conducteurs métalliques de nature différente sont soudés de manière à former un circuit, celui-ci est parcouru par un courant lorsque les soudures sont portées à des températures différentes : on met le phénomène en évidence dans les cours à l'aide de l'étrier de Seebeck, formé de deux lames AB et CDC de cuivre et de bismuth généralement; à l'intérieur du cadre ainsi formé que l'on dirige dans le plan du méridien magnétique, on place une aiguille aimantée ; celle-ci dévie lorsqu'on chauffe une des soudures et revient à sa position primitive quand les deux soudures sont ramenées à la même température.

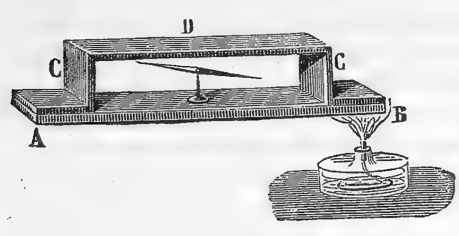


Fig. 502.

Pour les applications physiologiques, on emploie les aiguilles thermo-électriques de Dutrochet : une aiguille thermo-électrique est constituée par un fil de cuivre et un fil d'acier que l'on a soudés sur une certaine longueur vers leur extrémité et que l'on a usés à la meule pour les amener à l'état de pointe. Un couple thermo-électrique est constitué par deux aiguilles semblables dont les deux parties semblables, le cuivre par exemple, sont réunies par un fil métallique, tandis que les autres parties sont reliées respectivement aux bornes d'un galvanomètre. L'aiguille de celui-ci reste au zéro tant que les deux soudures sont à la même température, mais elle est déviée lorsque les soudures sont à des températures différentes et le sens de la déviation fait connaître quelle est la soudure la plus chaude.

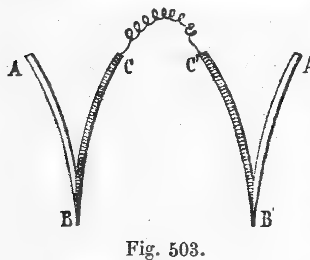


Fig. 503.

On peut même évaluer la différence de température, car il existe, pour un circuit donné, une relation entre l'intensité du courant, qui est indiquée par la déviation de l'aiguille, et les températures des soudures. Cette relation est complexe lorsque les températures sont quelconques, mais elle se réduit à une forme simple lorsque les températures diffèrent peu. Si on appelle t_1 et t_2 les températures des deux soudures et I l'intensité du courant, on a sensiblement dans ce cas

$$I = k(t_1 - t_2),$$

k étant une constante qui dépend de la nature des métaux et de la résistance du circuit. Si donc on a déterminé k par une expérience directe dans laquelle on mesure I, les températures t_1 et t_2 étant connues avec précision, on

pourra utiliser cette relation pour déterminer $t_1 t_2$ d'après la valeur observée de I.

Cette méthode permettrait de trouver la température t_1 d'un corps dans lequel on piquerait l'une des aiguilles, à la condition de plonger l'autre aiguille dans l'eau, par exemple, dont on déterminerait directement la température t_2 à l'aide d'un thermomètre sensible. L'exactitude sur laquelle on pourrait compter pour t_1 dépendrait de la précision avec laquelle on aurait évalué t_2.

Mais la méthode est surtout employée pour mesurer les petites différences de température, en physiologie notamment ; pour comparer, par exemple, la température du sang veineux et celle du sang artériel, la température d'un muscle qui se contracte et celle du muscle symétrique au repos, la température d'un insecte mort et celle d'un insecte de même espèce vivant, etc. Il suffit, dans ce dernier cas, par exemple, de piquer une aiguille dans chacun des insectes et d'observer la valeur du courant qui se produit.

La méthode est excessivement sensible ; aussi faut-il prendre des précautions pour éviter toute cause qui, produisant une force électromotrice même très faible, donnerait naissance à un courant qui se superposerait dans le galvanomètre à celui dû à la différence de température que l'on veut évaluer. Il faut notamment, si, en dehors des aiguilles, il existe des métaux différents en contact, prendre les précautions les plus minutieuses pour qu'il ne puisse pas se produire de variation de température en ces points. Lorsque les aiguilles sont introduites dans des tissus, on peut craindre que les métaux qui les constituent ne soient attaqués par les liquides qui imbibent les tissus, ce qui donnerait naissance à un courant. Pour éviter cette cause d'erreur, il est bon de recouvrir d'une mince couche d'un vernis inattaquable par ces liquides la partie des aiguilles qui doit pénétrer dans les tissus.

La déviation de l'aiguille du galvanomètre se compte à partir de la position que celle-ci occupe au début de l'expérience, et il faut qu'à ce moment les deux soudures soient rigoureusement à la même température. On ne pourrait être assuré que cette condition est remplie si on se bornait à laisser les aiguilles à l'air : il faut les plonger à la fois dans un bain liquide que l'on brasse avec un agitateur de manière que la température y soit certainement la même en tous les points.

Les aiguilles qui sont fines et dont la pointe est très acérée peuvent pénétrer dans les tissus sans y produire de dilacération, sans modifier par suite les conditions normales, ce qui est essentiel pour les recherches physiologiques.

D'Arsonval a modifié avantageusement la forme des aiguilles ; dans le modèle qu'il a adopté, chaque aiguille est constituée par un tube en nickel, légèrement conique ; à l'intérieur pénètre un fil de fer qui est soudé au sommet du cône : l'espace compris entre ce fil et le cône est rempli d'une matière isolante. Par cette disposition, le fer ne se trouve pas au contact des liquides de l'organisme qui baignent seulement le nickel moins attaquable.

Par l'emploi de la méthode que nous venons d'indiquer, on évalue facilement une différence de température qui n'est que de 0°,01 ; Helmholtz a pu

apprécier des différences qui ne dépassaient pas 0°,00025 $\left(\frac{1}{4000}\text{ de degré}\right)$.

Non seulement cette méthode est très sensible, mais elle est rapide : les masses en jeu sont petites d'une part et, d'autre part, étant métalliques, elles se mettent rapidement en équilibre de température avec le milieu dans lequel elles sont plongées.

En remplaçant les aiguilles par des sortes d'étriers au milieu desquels se trouvent les soudures et que l'on peut appliquer à plat sur la peau, par exemple, on peut déterminer des températures superficielles plus commodément et plus exactement que par l'emploi des thermomètres dits de contact.

11. — Il est très regrettable à notre avis que les médecins, en général, ne se livrent pas aux observations météorologiques. La connaissance de l'état climatique d'un pays, comprenant la pression barométrique, la température, l'état hygrométrique et, s'il est possible, la direction et la force du vent, serait non seulement intéressante en soi, mais, de plus, en la rapprochant des conditions de morbidité et de mortalité, on arriverait sans doute à établir, sur quelques points au moins, des relations entre les unes et les autres.

Quoique nous voulions nous borner ici à la question de la mesure des températures, nous dirons que les observations de toute nature doivent être faites par la méthode de l'enregistrement automatique. C'est la méthode qui donne le moins de peine et qui prend le moins de temps, puisqu'il suffit de régler les appareils une fois par semaine seulement, avantage qui n'est pas négligeable ; mais, de plus, cette méthode donnant des indications continues ne peut laisser échapper aucune modification, même de courte durée, tandis que par la méthode des observations périodiques on n'a aucun renseignement sur ce qui se passe entre deux observations.

Aussi nous ne nous arrêterons pas aux conditions dans lesquelles il convient d'opérer pour mesurer la température atmosphérique avec un thermomètre à mercure, et nous nous bornerons à décrire la disposition généralement adoptée pour les thermomètres enregistreurs.

Le thermomètre de Richard comprend un cylindre enregistreur tournant autour de son axe qui est vertical sous l'influence d'un mouvement d'horlogerie qu'il contient et qui lui fait effectuer un tour complet en une semaine : à l'aide d'un dispositif très simple, on adapte sur ce cylindre une feuille de papier présentant des lignes droites correspondant aux températures et des courbes correspondant aux divisions du temps. D'autre part, un tube fermé à section elliptique aplatie, présentant la forme d'un arc de cercle et rempli d'alcool, est fixé par une de ses extrémités à quelque distance du cylindre ; l'autre extrémité est reliée par l'inter-

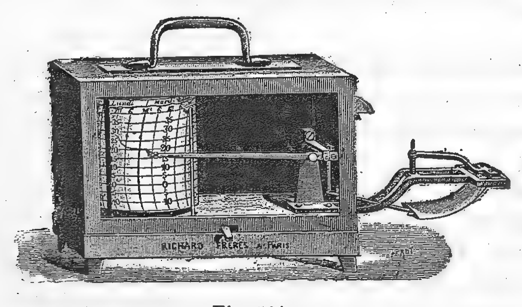


Fig. 504.

médiaire d'une petite bielle au petit bras d'un levier coudé, mobile autour d'un axe horizontal, dont le grand bras porte un style ou plutôt une plume spéciale qui vient presser contre la feuille de papier. La plume est remplie d'une encre qui ne se dessèche pas, de telle sorte qu'elle laisse un trait sur le papier lorsqu'il y a déplacement de l'un ou de l'autre ou de l'un et de l'autre.

Tant que la température reste constante, le tube à alcool conserve une forme invariable, le levier ni la plume ne se déplacent et celle-ci, si le cylindre tourne, trace une section droite du cylindre, qui, par le déroulement du papier, donne une ligne droite. Si la température change, si, par exemple, elle s'élève, il y a dilatation de l'alcool et de l'enveloppe métallique qui renferme le liquide; comme les dilatations sont inégales, il faut que le tube change de capacité : sa section se déforme donc, mais cette déformation ne peut se produire sans entraîner un changement de courbure du tube. L'extrémité libre se déplace donc, entraînant la bielle et le levier coudé : la plume se déplace sur le papier. Si le cylindre ne tourne pas, la plume décrit une courbe qui est justement une de celles qui ont été tracées à l'avance. Si le cylindre tourne en même temps que la plume se déplace par suite de la variation de température, la plume inscrit une courbe continue dont les variations de forme font connaître les variations de température en même temps que les instants auxquels celles-ci se sont produites.

TEMPÉRATURE (1)

Par J.-P. LANGLOIS

Les organismes animaux ont été divisés, au point de vue de leur température, en deux grands groupes : les animaux à sang chaud, les animaux à sang froid, les premiers ayant une température oscillant vers 39°, les seconds, au contraire, ayant généralement une température beaucoup plus basse, se rapprochant de celle du milieu ambiant.

Ce rapport constant entre la température des animaux à sang froid et celle du milieu extérieur a conduit à désigner ces deux groupes par des noms différents.

Les animaux du premier groupe ont été appelés animaux à température constante ou homéothermes, et ceux du second, animaux à température variable ou poïkilothermes.

Enfin, Richet, s'appuyant sur des considérations que nous exposerons plus loin, propose la classification suivante, que nous prendrons comme plan d'étude de ce chapitre.

Animaux qui ont une température invariable.

Mammifères et oiseaux adultes.	A 42° environ	Oiseaux.
	39° —	Mammifères.
	37° —	Homme.

Animaux à température variable.

α. Qui meurent quand leur température est inférieure à 20°	Mammifères et oiseaux nouveau-nés.
β. Qui s'engourdissent quand leur température est inférieure à 20°	Hibernants.
γ. Qui sont encore actifs quand leur température est inférieure à 20°	Reptiles, batraciens, poissons, mollusques, etc.

ANIMAUX POIKILOTHERMES

Ce groupe comprend tous les animaux en dehors des mammifères et des oiseaux.

(1) On trouvera toute la bibliographie de la température dans les quatre mémoires ci-dessous :
Richet, art. Chaleur du *Dictionnaire de physiologie*, 1898.
Pembrey, Animal Heat, *Text-book of physiology de Schäffer*, Londres, 1898.
Tereg, Thierische Wärme, in *Vergleichende Physiologie der Haussäugethiere*, 1892.
Morat et Doyon, *Traité de physiologie*, t. I, 1899.

En règle générale, ces êtres suivent, avec un léger excès, la température du milieu ambiant.

Le terme d'animaux à sang froid est certainement impropre, si l'on réfléchit que les endoparasites, les helminthes, etc., se trouvent nécessairement à une température de plus de 39°, parfois même de 43°, comme les parasites des oiseaux.

Chez les animaux homéothermes, la température a pu presque toujours être prise à l'aide du thermomètre dans la voie rectale. Il n'en est plus de même pour les êtres du second groupe, au moins pour beaucoup d'entre eux.

Très souvent, on a recouru aux mesures thermo-électriques (Newport, Dutrochet); d'autres fois, au thermomètre différentiel (Girard).

Chez les reptiles surtout, on trouve très souvent un excès très marqué de la

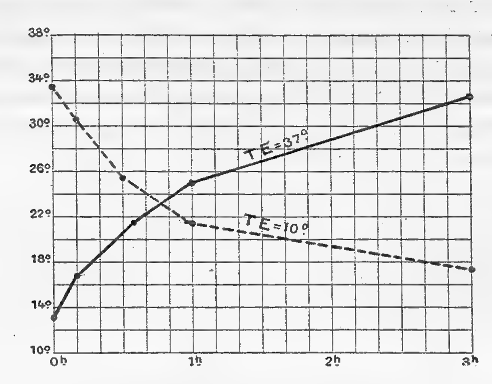


Fig. 505. — Variations de la température d'un animal à sang froid d'après celle de son milieu. Ligne pleine : tortue dont la température propre initiale est 13°, placée brusquement dans un milieu à la température de 37°. Marche du réchauffement. — Ligne de traits : tortue dont la température initiale est 33°, placée brusquement dans un milieu à la température de 10°. Marche du refroidissement (d'après Richet).

température interne sur le milieu ambiant : 7° chez un lézard (Czermak); 5°,5 chez une vipère (Hunter); 1°,8, crocodile (Richet); 1,3, tortues (Richet). Enfin, on connaît l'observation du boa du Muséum qui, couvant ses œufs, avait une température de 41°,5, alors que la chambre n'avait que 20 degrés.

Les grenouilles présentent un excès très faible, 0°,4 (Dutrochet), 1° à 2° (Czermak).

Les chiffres donnés pour les poissons sont si aberrants que nous ne les donnerons qu'à titre d'indications. Davy indique une température intramusculaire de 37°,2 chez une bonite pêchée dans une eau à 27°, mais en général leur température est à peine supérieure de 1 degré à celle du milieu ambiant.

Richet insiste avec raison sur la lenteur relative avec laquelle les animaux à sang froid prennent la température du milieu ambiant. Si on met une tortue à l'étuve à 35°, il faut plus de deux heures pour que l'animal atteigne cette température, et encore restera-t-il presque toujours légèrement au-dessous.

Le refroidissement se fait beaucoup plus rapidement.

Notons encore l'égalité de température observée chez les animaux soumis à des élévations thermiques anormales. Trois tortues mises à l'étuve présentent la même température, avec des oscillations des plus minimes : 37°-37,2-37 ; 30°,7-30°,8 ; 15°,8-15°,7 ; 31°,4-31°,5.

C'est une égalité que l'on ne trouve jamais chez les animaux à sang chaud.

Invertébrés. — Certains insectes présentent une température élevée exceptionnelle et due certainement à la dépense d'énergie considérable qu'ils déploient, mais en règle générale les invertébrés ne présentent qu'un excès très minime sur la température ambiante. Hunter et Newport, qui ont étudié principalement les abeilles, ont constaté souvent une différence de 15 à 16 degrés entre la température de la ruche et celle du milieu ambiant. Mais cette différence diminue quand les abeilles sont au repos; par un froid extérieur de 7°, la ruche était tombée à —1° ; il suffit de réveiller les insectes pour voir monter en moins de quinze minutes la température à 21 degrés.

Valentin donne un tableau où il a groupé les écarts observés suivant le groupe des animaux. On voit que l'écart sur la température ambiante s'élève avec la complexité même de l'être.

Polypes	0,21
Méduses	0,27
Échinodermes	0,40
Mollusques	0,46
Céphalopodes	0,57
Crustacés	0,60

ANIMAUX HOMÉOTHERMES

Pour établir des données comparatives, il est essentiel d'établir un premier point : c'est de prendre la température du sujet toujours dans le même endroit. Nous verrons plus loin qu'il existe des différences notables de chaleur d'une région à une autre.

La région normale adoptée est le rectum. Mais, ici encore, il faut préciser la façon dont la température est prise. Suivant, en effet, que le réservoir thermométrique est introduit à une profondeur plus ou moins grande, l'appareil donne des indications différentes. Pour un animal d'une espèce déterminée, on peut fixer approximativement, et indépendamment de la taille, la profondeur où doit être prise la température ; mais ce chiffre doit varier avec les espèces différentes : on ne saurait indiquer la même longueur pour une souris que pour un cheval. Quant au mode de lecture, il va de soi que l'on doit attendre, pour établir une lecture, que la colonne thermométrique ait atteint un chiffre maximum ; il est donc nécessaire de faire deux lectures au moins, et de n'arrêter l'observation que lorsque la colonne est restée stationnaire entre ces deux lectures.

Si on utilise un thermomètre sensible et régressible, cet état stationnaire est rarement atteint, la température interne oscillant continuellement sous l'influence des variations, même très faibles, dans l'irrigation sanguine de la

région explorée. Il faut alors indiquer le chiffre maximum observé. Généralement, on utilise des thermomètres dits à maximum, qui présentent l'avantage d'éviter une lecture continuelle.

En fait, les animaux dits à température invariable présentent constamment des oscillations thermiques plus ou moins fortes, mais qui, néanmoins, en dehors des cas pathologiques, oscillent entre des limites assez restreintes d'un degré à un degré et demi.

Parmi les mammifères, nous insisterons spécialement sur les températures de quelques animaux qui sont employés dans les laboratoires : chiens, lapins, cobayes, ou encore sur quelques animaux domestiques : cheval, vache, dont il importe de connaître la température, depuis surtout que la valeur thermique de la tuberculine, de la malléine, est couramment employée comme instrument de diagnostic.

Chien. — Si on prend dans les auteurs la température indiquée comme normale chez les chiens, on trouve des chiffres oscillant entre 40°,1, maximum, et 37°,9.

Nous donnerons quelques chiffres moyens signalés par les auteurs.

	Nombre d'observations.	Maximum.	Minimum.	Moyenne.	Observations.
Anrep	135	39,4	»	39,14	Même chien recevant atropine.
Anrep	77	39,6	38,5	38,8	id.
Dujardin-Beaumetz	244	40,5	37,9	39	
Richet	176	40,1	39,28	39,28	
Popel	40	39,7	38,3	39,1	Chiens copieusement nourris.
Hobday	200	39,2	38,1	38,6	

Richet admet le chiffre de 39°,25 comme chiffre moyen. Nous pourrons admettre également ce chiffre, tout en rappelant qu'en fait il est un peu plus élevé que la moyenne de beaucoup d'auteurs.

Enfin, rappelons qu'en dehors des conditions dont nous parlerons plus loin il faut tenir compte des individualités.

Deux chiens de fourrure identique, placés dans les mêmes conditions de température extérieure, de nourriture, ajoutons même de conditions psychiques identiquement apparentes, donnent, pendant cinq jours, l'un une moyenne de 39°,3 avec oscillations de 39° à 39°,7, l'autre une moyenne de 38°,8 avec oscillations de 38°,5 à 39°,1.

Il faut signaler cependant l'importance du tégument.

Un mâtin à poil ras indique une température de 38°,8, alors qu'un épagneul à long poil placé dans les mêmes conditions donne 39°,6, et cette différence est à peu près constante.

Cheval. — La température normale du cheval, prise d'après 1 200 observations, est de 37°,8, chiffre voisin de celui de l'homme, les températures extrêmes constatées étant 37 et 38°,6. Mais, étant donnée la constance thermique observée chez le cheval (Tereg), il y a lieu de rejeter comme anormal ce chiffre de 38°,6, et on peut admettre qu'un cheval ayant une température supérieure à 38° est déjà dans un état non physiologique.

Bœuf. — La température moyenne est de 39°,5 (Arloing), avec des oscillations de 37°,7 à 39°,6 (Hobday).

Lapins. — Il semblerait *à priori* que la température du lapin devrait présenter moins d'écart que celle du chien. Les différences de taille sont peu importantes, celles de pelage nulles, les animaux sont presque toujours du même âge, enfin l'influence psychique, évoquée pour le chien, paraît devoir être moins puissante sur le lapin, et, cependant, les écarts indiqués sont bien plus grands.

La courbe oscille entre 38°,3 et 40°,6 pour donner une moyenne de 39°,55 sur 232 observations (Richet). Température rectale prise profondément à 10 centimètres.

Dans beaucoup d'auteurs, la température moyenne de leurs animaux est plus faible ; le chiffre de 39°,2 est un des plus fréquemment cités et on rencontre souvent des températures de 37° données comme normales.

La température normale du lapin doit être prise très rapidement, autant que possible avant que l'animal soit attaché. Aussitôt fixé sur la planchette, on voit la température baisser rapidement pendant la première heure.

Cobayes. — La température du cobaye oscillerait entre 37°,8 et 40°,5 avec une moyenne de 39°,2 (Finkler).

Le tableau suivant indique la température constatée chez quelques animaux, d'après les moyennes des observations d'un certain nombre d'auteurs : Pembrey, Hobday, Richet, etc.

		Nombre d'observations.
Porc	38,7	100
Chat	38,7	41
Mouton	40,2	500
Renard	39,2	14
Chèvre	39,4	8
Rat	38,4	2
Souris	37,4	27
Lièvre	37,7	1
Hérisson	35,5	1
Singe (Rhesus)	38,3	45

Tous ces chiffres oscillent autour de 39°. On trouve même une température de baleine (38°,8, Scoresby) qui rentre dans ce chiffre.

Les monotrèmes, qui forment un ordre si étrange au point de vue de la philosophie zoologique, présentent une température exceptionnelle.

		Nombre d'observations.
Échidna	30°	7
Ornithorynchus	25°	2

Les oiseaux ont une température relativement très élevée :

		Nombre d'observations.
Canard	43,6	8
—	42,1	24
Oie	41,7	5
Pigeon	40,9	20
Autruche	37,3	5

LA TEMPÉRATURE NORMALE DE L'HOMME

La température de l'homme sain, prise dans le rectum, n'est jamais constante ; elle varie, ainsi que nous le verrons plus loin, sous l'influence de causes diverses. Il faut donc connaître simplement les températures minima et maxima observées chez un individu bien portant et dans les conditions normales de l'existence. Quant au chiffre moyen, il ne saurait être calculé en divisant par deux la somme des chiffres minima et maxima, mais doit être pris, soit en prenant la moyenne d'une somme de lectures faites à intervalles rapprochés sur un petit nombre de sujets, soit en prenant la moyenne d'un nombre considérable de lectures prises sur un grand nombre de sujets.

Le tableau suivant indique les moyennes de différents auteurs :

	Température rectale.	Température axillaire.
Jurgensen	37,7	37,2
Wunderlich	37,3	37
Jäger	37,1	37,3
Œrtmann	37,2	37,2
Redard	38	37,5

En prenant la moyenne générale donnée par ces cinq auteurs, nous trouvons 37°,44. Nous croyons qu'on peut admettre un chiffre facile à retenir de 37°,5.

Courbe quotidienne. — Dans les conditions normales, la température oscille d'un degré environ dans les vingt-quatre heures. La courbe constante,

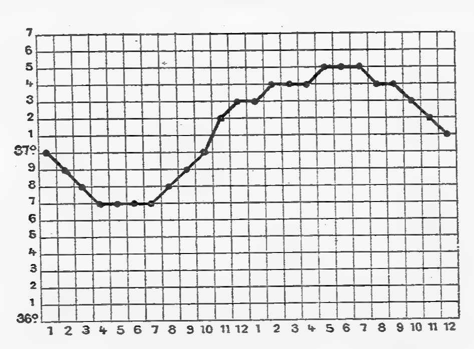


Fig. 506. — Oscillations nyctémérales de la température, de minuit à minuit (d'après Jurgensen).

d'après les chiffres recueillis par Jurgensen, indique un écart de 0°,8 avec un minimum vers 5 heures du matin (36°,7) et un maximum vers 6 heures du soir (37°,5). Il s'agit, bien entendu, d'une courbe construite avec des moyennes, prises pendant trois jours sur trois individus sains, soit neuf courbes primitives. L'écart de quelques-unes a dépassé le degré.

La courbe de la température axillaire accuse une différence plus grande encore : 1°,3, le minimum à 3 heures du matin étant 36°,1 et le maximum à 4 heures du soir de 37°,4 (Billet).

Dans les minimums, 35°,65-35°,8 (Gley), ces basses températures ont été observées vers 3 heures du matin.

Signalons encore la différence dans la forme des courbes construites d'après la température rectale et d'après la température buccale.

Dans la première, la marche ascendante se fait régulièrement, présentant un minimum nocturne et un seul maximum, alors que dans les courbes obtenues avec les températures axillaires nous remarquons deux maximums, l'un faible vers 7 heures du matin, suivi d'une chute thermique passagère, puis suivi d'une période ascensionnelle qui aboutit au second maximum correspondant à celui de la courbe rectale (Billet, Bærensprung).

Topographie thermique. — En clinique, la température est toujours prise soit dans le creux axillaire, soit dans le rectum, ou encore dans le vagin, ces deux dernières étant presque identiques.

On comprend que la température axillaire doit généralement être inférieure à celle du rectum. Lorain donne les chiffres moyens suivants :

Température rectale.	Température axillaire.	Différence.
37,6	36,76	— 0,74

chiffres également trouvés par Gassot.

Cette différence de 0°,7 n'est malheureusement pas constante. Nous avons vu que la courbe de la température axillaire n'affectait pas la même forme que la température centrale. On n'est donc pas autorisé à comparer des chiffres indiquant tantôt la température rectale, tantôt la température axillaire, en augmentant ces derniers d'une constante. C'est cependant une coutume fréquente en clinique, où l'on ajoute un demi-degré à la température axillaire observée pour inscrire la température centrale.

La température buccale a souvent servi dans les recherches scientifiques ; elle ne peut être utilisée en clinique. En règle générale, elle est légèrement inférieure à celle du rectum de 2 à 3 dixièmes de degré.

La température axillaire prise avec un thermomètre ordinaire, le bras étant ramené sur le corps, ne peut en réalité être appelée une température périphérique, prise dans le sens de la température de la surface du corps. Les conditions mêmes dans lesquelles on se place ont pour but de donner au médecin une indication approximative des variations thermiques générales.

Dans les mesures de températures périphériques, on doit chercher avant tout à connaître la température exacte de la peau placée dans les conditions normales de radiation, d'évaporation, etc. Ces conditions mêmes sont difficiles à réaliser et expliquent l'abondance des thermomètres locaux inventés dans ce but : Walferdin, Redard, Weir Mitchel, Séguin, Kuchenmeister, Laborde, Dupré, Granville, Lépine, Peter, Kronecker, Leffmann, Anrep, Voisin, Constantin, Paul, Broca Sabatier.

En réalité, tous ces appareils présentent de graves inconvénients et ne peuvent que donner des résultats comparatifs.

Les appareils thermo-électriques employés pour la première fois par Becquerel en 1835, et si perfectionnés depuis, permettent au contraire des mesures rapides et précises. Signalons les thormomètres thermo-électriques

construits par J. Lefèvre et donnant des mesures très précises des températures périphériques et profondes (*Archives de physiologie*).

Sans nous arrêter aux travaux antérieurs, nous citerons les chiffres suivants empruntés à Stewart (1891), pris pendant une température extérieure de 17°,6.

Surface antérieure de l'avant-bras	34,4
— postérieure de l'avant-bras	34
Pointe du sternum	34,7
Joue	23,7
Paume de la main	31
Plante du pied	30,6

Ces chiffres sont bien inférieurs à ceux indiqués par Redard, qui donne pour la joue 36°,5, la paume de la main 35°,5, la face plantaire 34°,5. Le chiffre le plus bas de Redard est pour l'extrémité des doigts de pied 31°,8. Mais il ne donne pas la température extérieure, se contentant d'indiquer qu'elle reste constante pendant toute la durée des mensurations.

Signalons des contradictions assez fortes entre les auteurs. D'après Redard, la température périphérique présente des oscillations considérables, alors que pour Kunkel elle est très sensiblement constante et oscille autour de 34°,3.

Influence de l'âge. — En dehors des variations de température que l'on observe chez l'enfant à la naissance et dans les deux premiers jours, on peut dire que cette influence est nulle. Si le tableau donné par Bærensprung semble indiquer que la température moyenne s'élève chez les vieillards de quatre-vingts ans (37°,46), Moleschott expliquait cette élévation par la sécheresse de la peau qui empêchait l'évaporation; les observations de Mossé, de Ducamp, portant sur 150 cas, montrent, au contraire, une faible diminution à partir de soixante-dix ans, le chiffre moyen, chez eux, n'atteignant pas 37°.

Influence du sexe. — *Nulle.* Peut-être la menstruation provoque-t-elle une légère élévation thermique (Wunderlich, Riehl). Mais il faudrait établir si cette élévation est constante chez les femmes qui n'ont aucun malaise au moment des règles.

Richet n'a noté également aucune différence entre les chiens et les chiennes.

Influence de la race. — *Nulle* (Jousset, Glogner, Eykmann).

Influence du climat et de la température extérieure. — Les différences que l'on avait cru constater entre les différentes races tenaient exclusivement aux climats : dans les pays tropicaux, Européens et indigènes ont une température légèrement supérieure à celle observée dans les pays tempérés (37°,75 à 38°) (Jousset). Les expériences anciennes de Davy (1811), de Brown-Séquard (1854), avaient montré que la température buccale s'élevait avec l'élévation thermique extérieure ; le chiffre cité par Davy, 1°,93 de différence entre la température humaine à Londres et la température à Ceylan, est certainement trop fort.

Dans les pays froids, on note également une baisse légère, puisque les Norvégiens admettent comme chiffre normal 36°,4, chiffre qui est un indice d'hypothermie.

Il faut signaler ici une remarque intéressante de Glogner. Le maximum

thermique quotidien, qui est atteint en Europe vers 3 ou 4 heures de l'après-midi, se produirait vers 10 heures dans les pays tropicaux.

Influence de l'activité musculaire. — L'activité musculaire est la principale source de l'énergie calorique dans l'organisme. Entre un muscle au repos physiologique (simple tissu) et un muscle au travail, la dépense chimique varie du simple au quadruple. On doit donc prévoir que tout travail musculaire peut élever la température ; il est curieux même de noter la puissance du système régulateur qui empêche cette accumulation du calorique formé dans l'organisme.

Après un travail important, une exagération considérable dans les échanges gazeux, la température rectale ne s'élève guère que de 1 degré. Les tempé-

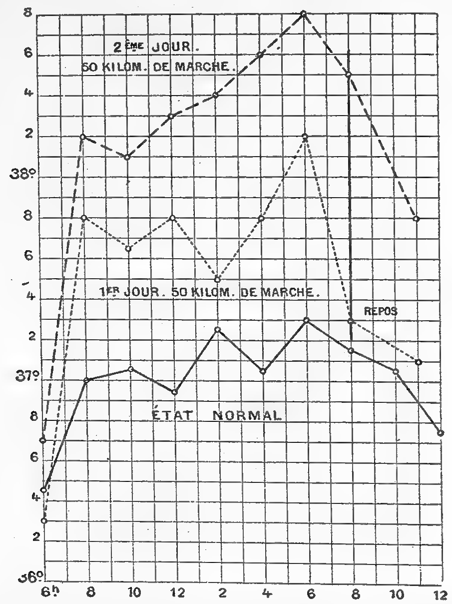


Fig. 507. — Influence du travail musculaire (marche forcée de 100 kilomètres) sur la température. Ligne inférieure : état normal, 1er jour ; ligne moyenne : 2e jour, 50 kilomètres ; ligne supérieure : 3e jour, 50 kilomètres (d'après Morat).

ratures de 39°, 39°,5 chez l'individu travaillant même énergiquement (ascension en montagne) (Forel, Marcel) sont exceptionnelles, et il y a lieu de se demander, dans ce cas, si la fatigue, soit par un épuisement nerveux, soit par production de substances toxiques, n'a pas amené un état morbide, entraînant une perturbation de l'appareil régulateur.

Dans les conditions normales, on peut dire que le travail n'élève la température que de 0°,5 à 0°,7, et que rapidement après la mise au repos de l'appareil moteur la température redevient normale.

VARIATIONS MORBIDES DE LA TEMPÉRATURE

Nous avons vu que chez l'homme normal les oscillations thermiques varient de près de 2 degrés, les deux extrêmes étant 36° et 38°.

On peut donc admettre que tout individu présentant une température inférieure à 36° ou supérieure à 38° est dans un état anormal.

Les températures morbides extrêmes constatéeschez l'homme sont de 22°,6 (Reinhardt, Richet) et 46° (Capparelli). Ces deux températures sont évidemment exceptionnelles ; toutefois, Richet a pu réunir 36 cas authentiques de températures inférieures à 32°, dont 6 au-dessous de 25°.

Les températures de 42° sont encore assez fréquentes, et Richet a réuni 226 observations dans lesquelles la température a atteint ou dépassé 42°. Il est certain que ce chiffre serait facilement dépassé.

Les chiffres de 43° et au-dessus sont déjà beaucoup plus rares, 121 ; mais ce chiffre même, représentant la moitié des observations, montre que les cas de 42° doivent être beaucoup plus fréquents. On trouve encore, dans les tableaux de Richet, 22 cas entre 44 et 45° ; puis 3 de 45 à 45°,9, et enfin 4 cas de 46 degrès.

Dans le cas de Diez Obelard, la température se serait maintenue pendant dix-huit jours à 46° (?).

Richet admet ces températures comme vérifiées, mais il hésite à accepter l'observation de Gailbrailh (1891), professeur à *Omaha medical College*, qui, chez une femme atteinte de péritonite, a trouvé, avec des thermomètres vérifiés, une température oscillant entre 55°,6 et 66°,1

Bien que le pronostic soit toujours grave quand la température dépasse 42°,5, il existe quelques cas de survie après des élévations thermiques supérieures.

43°,6	Syphilis cérébrale	Paget.
43,6	Scarlatine	Vicente et Bloch.
43,4	Rhumatisme	Wilson Fox.
44	Hystérie.	
44,9	Ictère hystérique	Lorentzen.
46,4	Fièvre	Capparelli.
46,1	Coup de chaleur	Gannett.

Les affections dans lesquelles on observe ces hyperthermies extraordinaires sont le rhumatisme, les myélites (?), la scarlatine, le tétanos, et enfin l'hystérie.

En ce qui concerne l'hypothermie, les températures de 35 et même 34° ont été souvent constatées dans le type dit fièvre algide ; la rémission a pu se produire après douze heures d'une température voisine de 34°, mais c'est là une limite extrême (Libermann).

Les cholériques ont également des températures quelquefois extrêmement basses (34° ; Lorain). Mais il faut remarquer que la température prise dans la bouche des cholériques (Czermak) est toujours très basse, et ne peut permettre de déduire la température centrale.

C'est ainsi que Czermak cite des cas de guérison chez des femmes ayant eu 19° 3/8 R., soit 24°,6 C. dans la bouche, alors que les chiffres pris chez d'autres cholériques par Bærensprung nous montrent que pour une température de 27° dans la bouche on trouvait 35° dans le rectum.

Oscillations thermiques morbides. — En dehors des variations

extrêmes dont nous venons de parler, ce qu'il importe d'étudier ce sont les oscillations mêmes de la température dans les formes morbides.

Une température continue de 38°,5 matin et soir sans rémissions marquées à un moment de la journée est souvent un indice plus grave qu'une température de 39°,5 le soir avec chute à 37°,7 ou 38° le matin. La courbe varie d'ailleurs suivant la maladie ; le type normal de la fièvre typhoïde, par exemple, est caractérisé par ces grandes oscillations entre l'ascension vespérale et la chute matinale, l'écart pouvant atteindre 3 degrés. Dans certaines formes de granulie, on observe une courbe inverse, l'exacerbation se produisant le matin.

Dans les maladies cycliques, le retour à l'état thermique notable peut se faire brusquement par une défervescence brusque ; quelquefois même la chute est telle que la température s'abaisse au-dessous des limites normales. Dans la fièvre récurrente, après des hyperthermies de 42°, on a noté quelquefois une hypothermie de 34° (Wunderlich, etc.). D'autres fois le retour se fait lentement, en lysis, ou bien par secousses successives, *en terrasse* (Michaël).

Signalons enfin les cas de colapsus dans lesquels la température ne s'arrête pas dans sa marche descendante, et où on peut constater les hypothermies citées plus haut : 32°, 31°, etc.

POISONS ET TEMPÉRATURE

Les substances toxiques introduites dans l'organisme peuvent modifier la température par plusieurs mécanismes.

Action vaso-motrice. — On conçoit que les substances vaso-dilatatrices : nitrite d'amyle, nitro-glycérine, en exagérant la vaso-dilatation périphérique, augmentent par cela même la radiation thermique et peuvent faire tomber la température centrale ; inversement agissent les poisons vaso-constricteurs.

En réalité, sur l'animal normal ayant son appareil régulateur intact, les perturbations vaso-motrices accidentelles agissent peu sur la température centrale, parce que l'appareil régulateur supplée, soit à la diminution, soit à l'augmentation de la radiation calorique, par une variation en sens inverse dans l'activité des échanges. Mais chez l'organisme dont le système régulateur est perturbé, dans la fièvre par exemple, il n'en est plus de même et la même dose de substance vaso-dilatatrice qui est incapable de faire tomber la température d'un demi-degré chez l'homme sain, amène une chute de la deuxième chez le fébricitant.

Action générale sur les échanges. — En fait, l'action hyperthermisante ou hypothermisante des substances toxiques est liée essentiellement à leur action sur l'activité même des cellules de l'organisme, par l'intermédiaire du système nerveux.

En règle générale, on peut dire que tout poison stimulant le système nerveux détermine une élévation thermique, alors que tout poison amenant la dépression de ce système, entraîne un abaissement thermique.

Les poisons convulsifs amènent une élévation thermique considérable. Avec la strychnine, la vératrine, la cocaïne, on peut voir monter la tempé-

rature à 44° et même 45°,6, température ultime constatée seulement au moment de la mort.

Quant au mécanisme même de cette élévation thermique, il paraît lié nécessairement à la libération de l'énergie musculaire mise en jeu à la suite de l'excitation nerveuse. Le système nerveux n'est pas le siège de processus chimiques assez intenses pour jouer un rôle important dans cette dépense de chaleur ; les glandes, en y comprenant la masse hépatique elle-même, ne peuvent apporter qu'un faible contingent thermique, et c'est dans la masse musculaire qu'il faut chercher l'origine des calories dégagées qui permettent cette élévation thermique de 4 à 5 degrés en moins d'une heure, malgré et en dépit de l'augmentation parallèle dans la radiation calorique.

Il suffit du reste de supprimer le rôle des muscles en laissant intacte l'activité cérébrale et glandulaire, par une injection de curare, pour voir que l'élévation thermique à la suite d'injection de doses convulsivantes de cocaïne et de strychnine est sinon nulle, au moins très faible (P. Langlois et Ch. Richet). Ces faits ont, il est vrai, été contestés par Angelo Mosso, qui a vu la température monter chez un chien curarisé, puis cocaïné. Mais toute la question porte sur la dose de curare donnée. Si la dose est faible, l'interruption physiologique entre le nerf et le muscle n'est pas absolue et il existe alors des contractions faibles, mais généralisées, suffisantes pour expliquer l'élévation de la température.

La même substance, suivant la dose injectée, peut produire des effets thermiques différents, mais qui s'expliquent facilement. Avec la vératrine, par exemple, on peut observer trois phases successives en injectant successivement des doses croissantes :

Une première phase (injection de $0^{mgr},01$ par kilogramme de chien), léger abaissement thermique par suite de l'action vaso-dilatatrice bulbaire ;

Deuxième phase ($0^{mgr},5$ à 1 milligramme par kilogramme), élévation thermique déterminée par la persistance des convulsions cloniques ;

Troisième phase (20 à 30 milligrammes), abaissement thermique coïncidant avec une véritable curarisation généralisée, l'excitation directe du nerf moteur restant sans effet sur le muscle.

Quant aux poisons hypothermisants, ce sont par excellence les anesthésiques : chloroforme, chloral, éther, alcool, morphine, tous les agents qui amènent une dépression du système nerveux et par suite une diminution dans la tonicité générale.

La période de dépression générale est presque toujours précédée d'une période d'excitation ; or, pendant cette période la température s'élève, pour s'abaisser ensuite, quand la phase dépressive survient.

L'abaissement thermique peut aller en s'accentuant jusqu'à la mort, si on ne s'oppose pas aux pertes caloriques, car tout pouvoir régulateur est désormais supprimé.

Les températures les plus basses constatées chez l'homme appartiennent à des alcooliques surpris par le froid.

Les poisons minéraux : mercure, phosphore, arsenic, amènent également l'hypothermie ; mais ici le mécanisme est plus complexe. Non seulement le

système nerveux est touché, mais les agents directs de la thermogénie sont également atteints dans leur vitalité : dégénérescence graisseuse principalement du foie.

TEMPÉRATURE DES NOUVEAU-NÉS

La température du nouveau-né, au moment même de la naissance, avant la section du cordon (Schäffer), est supérieure à la température vaginale ou rectale de la mère.

Ce fait avait été établi pour la première fois par H. Roger, et a fait l'objet de nombreuses recherches, et, malgré quelques faits contradictoires, on peut admettre que la température moyenne de l'enfant au moment même de la naissance : 37°,80, dépasse de 0°,1 à 0°,3 la température interne de la mère.

Ce minime excès thermique observé chez le fœtus s'explique facilement. Le sang placentaire est à la température même de l'utérus, et suffisait à lui seul à maintenir l'égalité thermique entre le fœtus et l'organe maternel; mais le premier, dont les tissus sont le siège d'une activité néoformatrice intense, produit de la chaleur qui ne peut radier facilement dans une ambiance de température presque égale, et qui n'est pas totalement enlevée avec le sang efférent.

Mais très rapidement cet excès de température disparaît, et même, pendant les premières heures qui suivent la naissance, la température est plutôt basse, au-dessous de 37°, et ce n'est que vers le deuxième jour qu'elle remonte au chiffre moyen de 37°,5 pour s'y maintenir ensuite, si aucune cause perturbatrice n'intervient.

Les animaux à sang chaud nouveau-nés sont caractérisés, en effet, par une absence presque totale de résistance au refroidissement. William Edwards cite quelques chiffres démonstratifs :

Des lapins nés depuis quelques heures, baissent en une heure de 15 degrés ;

Des moineaux âgés de huit jours baissent en une heure de 17 degrés ;

Des merles enfin ont vu leur température diminuer de 23 degrés en moins d'une heure.

Dans la maladie désignée par Hervieux sous le nom d'algidité progressive, le symptôme essentiel est représenté par la baisse de la température, quelquefois jusqu'à 21°, chiffre extrême constaté au moment de la mort (Parrot).

Cette diminution peut se rattacher à plusieurs causes, mais l'essentielle est certainement la non-entrée en jeu de l'appareil régulateur. La petitesse de la taille, l'absence de téguments ne sont pas des causes suffisantes, car les jeunes animaux des grandes espèces sont encore plus gros que certains mammifères, et d'autre part, si les animaux rasés se refroidissent, c'est lentement, et même ils arrivent à neutraliser l'absence du manteau isolant, soit par la vaso-constriction périphérique, soit par une consommation plus grande de combustibles. Ce sont ces deux mécanismes compensateurs qui manquent précisément chez les nouveau-nés, ce qui fait dire à Richet que le nouveau-né est un animal à sang froid qui a besoin d'avoir chaud.

Déjà Milne Edwards avait vu ce rôle du système nerveux. Il constata, en effet, que les animaux qui naissent les yeux ouverts étaient plus résistants.

C'est qu'en fait l'état des yeux est en fonction du développement du cerveau. Les recherches de Soltmann, de Tarchanoff, etc., ont montré que chez les animaux nouveau-nés la couche corticale était à peine développée, que son activité fonctionnelle était pour ainsi dire nulle, sauf chez les êtres qui dès leur naissance ont les yeux ouverts, marchent, etc., comme les cobayes par exemple. La vision distincte est en fait corrélative du développement des centres corticaux.

TEMPÉRATURE DES HIBERNANTS

Les animaux hibernants présentent ce fait caractéristique que pour des températures extérieures d'été ils se comportent comme les animaux homéothermes, et pour les températures basses comme les hétérotermes. Il y a lieu de distinguer les faux hibernants, qui, comme l'écureuil, l'ours, etc., s'engourdissent pendant l'hiver, mais se réveillent très facilement et conservent leur température normale ou présentent une chute thermique négligeable ; et les vrais hibernants, tels que la marmotte, le hérisson, etc., etc. Ces animaux paraissent avoir, même pendant leur période d'activité, une température relativement basse :

Chauve-souris, 34° (Pembrey), 30° (Saissy) ; marmotte, 29° (Valentin), 35° (Pembrey), 38° (Saissy), 37° (Berger) ; hérisson, 32° (Pembrey), 38° (Saissy).

Les écarts considérables observés montrent que ces animaux, même quand ils sont à l'état de veille, ont un appareil régulateur thermique très défectueux. Pendant l'hibernation, la température rectale baisse très lentement pour arriver, quand la température extérieure est voisine de zéro, à 1°,60 (marmotte de Valentin), à 2°,50 (hérisson de Valentin). Mais si l'abaissement thermique se fait très lentement, le relèvement au moment du réveil est au contraire très rapide. Horvath constate qu'une marmotte qui avait 14° au moment où elle commençait à bouger, avait, dix minutes après, 32°. D'après Dubois, cette élévation aurait pour origine une production intense de calories dans le foie ; ce qui est certain, c'est qu'à ce moment les échanges respiratoires sont très actifs et qu'il se produit une véritable décharge d'acide carbonique.

RÉPARTITION DE LA TEMPÉRATURE

Davy avait déjà vu, en prenant la température des différents organes d'un mouton que l'on venait de sacrifier, que les organes abdominaux étaient plus chauds que les muscles des membres.

Le sang pouvant être considéré comme le distributeur et le répartiteur de la chaleur animale, l'étude même des variations thermiques du milieu sanguin présente un intérêt essentiel.

Davy introduisait dans les vaisseaux des thermomètres à petites cuvettes ; Becquerel et Breschet firent cette étude à l'aide d'aiguilles thermo-électriques. Mais ce sont les recherches de Herdenham et Korner en 1871, de Cl. Bernard et d'Arsonval en 1876, qui ont bien établi la topographie calorique centrale.

Le sang du cœur droit est toujours plus élevé que celui du cœur gauche (cœur droit 38°,30, cœur gauche 38°,10).

La température du sang artériel s'abaisse depuis le cœur jusqu'à la périphérie.

En ce qui concerne le sang veineux, il y a lieu de distinguer deux départements.

Les veines qui viennent de la peau renferment un sang refroidi ; le sang de la jugulaire, par exemple, est de 1 degré inférieur à celui de la carotide.

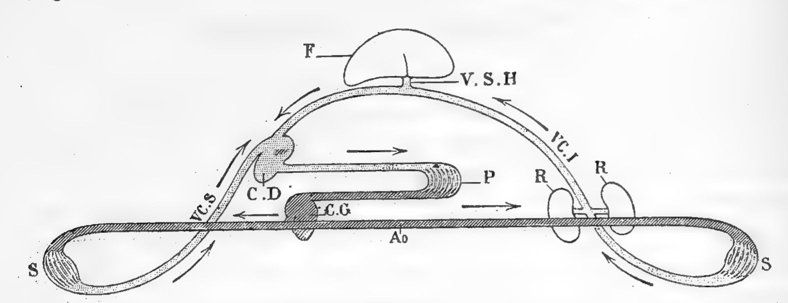


Fig. 508. — Schéma de la distribution topographique de la température dans les gros vaisseaux. Le degré de température de ceux-ci est exprimé en chaque point par sa hauteur au-dessus d'une abscisse conventionnelle qui est ici l'aorte. — Ao, aorte (température sensiblement égale); CG, cœur gauche; P, poumon; CD, cœur droit; R, rein; F, foie; VCS, veine cave supérieure; VCI, veine cave inférieure; S, surfaces les plus exposées au froid (membres et face) (d'après Cl. Bernard).

Au contraire, le sang veineux qui provient des viscères abdominaux, du foie surtout, est plus chaud que le sang afférent à ces mêmes organes.

Le maximum de température est constaté dans le sang de la veine cave après réception des veines sus-hépatiques, et si la différence de température entre le cœur droit et le cœur gauche est assez faible, 0°,2, cela tient à l'apport du sang de la veine cave supérieure qui, nous l'avons vu, est plus froid que le sang artériel.

Aorte	38°,4
Veine porte	39,4
Veine hépatique	39,8
Veine cave inférieure	39,5
Cœur droit	38,8

La température maxima constatée dans le sang qui s'échappe du foie, température supérieure de près de 1 degré, s'explique par l'activité intense des processus chimiques dans cet organe aux fonctions multiples ; elle est en rapport avec la consommation d'oxygène observée, le sang de la veine sus-hépatique étant toujours très pauvre en oxygène.

Les recherches de Cl. Bernard ont montré que chez les animaux en pleine digestion la température des veines sus-hépatiques était de deux à trois degrés plus élevée que chez les chiens à jeun.

Quant à la différence constatée entre le sang du cœur droit et celui du cœur gauche, elle s'explique par les processus physico-chimiques qui se

passent dans le poumon, phénomènes qui sont encore loin d'être bien déterminés aujourd'hui.

Richet fait le calcul suivant :

La combinaison de l'oxygène avec l'hémoglobine (750 grammes en vingt-quatre heures) dégage 355 calories.

Mais cette équation exothermique est compensée et au delà par trois facteurs :

L'échauffement de l'air intrapulmonaire, 15 000 litres passant de 12 à 36° = 110 calories ;

La volatilisation de CO^2 qui passe de l'état dissout à l'état gazeux, 880 grammes de CO^2 exigeant 120 calories ;

La vaporisation de l'eau : 440 grammes = 236 calories.

Soit un total de 466 calories fournies par le sang, dont il faut déduire 355 calories produites par la combinaison de l'oxygène. Reste un déficit de — 111 calories.

Les variations observées dans les différents départements vasculaires chez des animaux sains sont encore exagérées chez les animaux fébricitants.

Sur des lapins dont la température centrale (température prise dans l'abdomen à l'aide d'une sonde électrique) était de 41°,1 à 41°,4, à la suite d'injection de malléine et de tuberculine, d'Arsonval et Charrin ont constaté : un excès, pour le foie, de 1°,5 à 2°, pour la rate, de 0°,5, et une diminution pour le poumon et le cerveau de 0°,5 à 1 degré.

Il faut signaler encore l'excès de température de la moelle osseuse du fémur sur la température de la masse musculaire de la cuisse (d'Arsonval et Charrin, *B. B*, 1896, p. 277).

TEMPÉRATURE APRÈS LA MORT

Normalement le corps commence à se refroidir immédiatement, après une mort violente. Dans la mort naturelle, survenant à la suite d'une affection morbide quelconque, l'abaissement thermique commence souvent avant l'arrêt cardiaque ; enfin, dans certains cas, la température, loin de baisser, augmente immédiatement après le décès, et se maintient élevée pendant un certain temps.

Le cadavre se comporte en fait comme un corps inerte, et la durée de son refroidissement dépend de la température ambiante pour un corps de volume déterminé.

Guillemot donne les durées suivantes :

Température extérieure....	20°	10°	5°
Durée du refroidissement.........	30 h.	44 h.	50 h.

Depuis la première observation de Busch en 1819, d'une élévation thermique *post mortem*, les cas cités ont été fort nombreux, tant chez l'homme que chez les animaux.

C'est généralement dans le cas de fièvres infectieuses, de traumatisme du cerveau, que l'on a noté cette ascension *post mortem* : tétanos 44°,75, *post*

mortem 45°,37 (Wunderlich) ; épilepsie 42°,2, *post mortem* 43°,3 (Parinaud).

Richet insiste sur l'influence exercée par le genre de mort sur la courbe thermométrique *post mortem*, le choc nerveux, l'écrasement du bulbe.

Si la force commune qui préside à l'association si complexe des processus qui constituent la vie disparaît au moment de la mort, chaque cellule isolée reste encore vivante ; elle est le siège de combinaisons chimiques exothermiques momentanées qui expliquent l'élévation thermique *post mortem*.

RÉGULATION THERMIQUE

La constance de la température, ou du moins les faibles écarts constatés dans la température des animaux homéothermes, quelles que soient les modifications thermiques du milieu ambiant, ou même les causes intrinsèques d'une élévation, indiquent l'existence d'un mécanisme régulateur.

La température reste constante parce que la production des calories est exactement compensée par la perte, et ces deux processus étant susceptibles d'être modifiés, la constance ne peut être obtenue que par un équilibre régulier dans ces deux fonctions.

On conçoit immédiatement que les variations thermiques observées sont dues soit à une augmentation de production de calories non compensée par une déperdition correspondante, soit par une déperdition diminuée, sans que la production ait variée. Ou bien encore les deux processus peuvent se modifier simultanément, mais non avec une valeur concordante.

La régulation de la température ou thermotaxis est obtenue par la compensation réciproque entre la production de chaleur (thermogenèse) et la déperdition (thermolyse).

Le mécanisme même de la thermogenèse comprend des tissus thermogéniques, des nerfs et des centres thermogéniques.

Tissus thermogéniques. — En fait, tous les tissus vivants sont source hermique, mais les muscles ayant l'activité chimique la plus intense, mesurée d'après la production de CO^2 (Renard) et représentant les 43 p. 100 du poids total de l'organisme, on peut admettre que les muscles contribuent pour les trois quarts à l'activité chimique et par suite à la thermogenèse.

Proportion encore trop faible, si on réfléchit que ces calculs sont faits en partant des échanges des muscles au repos, et que dans le travail l'activité chimique musculaire, parfois quadruple, doit représenter les 93 p. 100 de la chaleur produite. Le cœur seul représente les 5 à 10 p. 100 de la chaleur produite. Que la contraction musculaire soit cause d'élévation thermique, c'est un point hors de conteste et sur lequel nous n'insisterons pas ici.

En mesurant le dégagement de CO^2 et la température sur un animal tétanisé, on voit les deux courbes s'élever régulièrement.

Chez l'animal à moelle sectionnée, au contraire, les échanges diminuent, la température s'abaisse. Il en est de même dans une région musculaire séparée du centre cérébro-spinal par la section des nerfs ou par la curarisation.

Que le système nerveux, grâce à ses fibres motrices, détermine par les con-

tractions musculaires une augmentation des échanges et par suite une production de chaleur, le fait est indéniable; mais en dehors de ce mécanisme, existe-t-il des incitations nerveuses spéciales ayant pour effet d'augmenter les échanges ou de modifier leur nature en déterminant ainsi une suractivité thermogénique? Existe-t-il des nerfs et des centres thermogéniques? Telle est la question aujourd'hui encore controversée.

Nerfs thermogéniques. — Cl. Bernard ayant constaté des modifications thermiques dans certaines régions, à la suite de l'excitation ou de la paralysie de certaines fibres nerveuses, avait émis l'idée que ces changements de température devaient être attribués à une action directe de ces nerfs, qu'il appelait nerfs céphaliques; mais il reconnut plus tard que ces modifications thermiques dépendaient uniquement des variations de la circulation sous l'influence de ces mêmes nerfs, appelés plus exactement vaso-moteurs, et la question des nerfs thermiques paraissait enterrée, quand elle fut reprise en 1889 par Kemp, en 1891 par Reichert.

Ces auteurs s'appuient surtout sur l'existence des centres thermiques supérieurs pour admettre qu'il doit exister dans les muscles deux processus de désassimilation, l'un fournissant l'énergie utilisée dans la contraction, l'autre se manifestant uniquement par une production de chaleur. Si ces deux processus existent, il est plausible de supposer l'existence de deux groupes de conducteurs nerveux, l'un assurant la transformation énergétique, ce seraient les fibres motrices, l'autre présidant aux processus cataboliques essentiellement thermogéniques, ce seraient les fibres thermogéniques spécifiques.

Mais il n'y a là qu'une hypothèse, et le trajet de ces fibres reste problématique.

Centres thermogéniques. — Le fait que l'organisme, pour maintenir sa température constante dans un milieu refroidi, exagère ses combustions intérieures, a été constaté par de nombreuses observations. Et il est certain que cette activité chimique est sous la dépendance du système nerveux.

D'autre part, une série de recherches montrent que certaines lésions portant sur le système cérébro-spinal amènent des modifications dans la température, qui ne peuvent être expliquées par des variations simplement vaso-motrices ou pulmonaires.

La première observation de l'hyperthermie à la suite de lésions nerveuses remonte à Brodie (1837), qui constata une température de 43°,9 après fracture de la colonne vertébrale avec lésion de la moelle cervicale. Simon signala un cas de 44° dans les mêmes circonstances. Dans un cas de fracture de la colonne vertébrale à la hauteur de la septième cervicale, la température est maintenue pendant vingt heures autour de 43°,1, pour tomber brusquement en moins d'une heure à 34° au moment de la mort (Langlois). Breadburg cite dans un cas analogue des oscillations de 35 à 42° (1885).

L'écrasement de la moelle chez le chien peut faire monter la température de 40° à 42°.

Rôle de l'encéphale. — Les expériences démontrant l'influence des lésions localisées centrales sur la thermogenèse datent de 1884. Cette

année même, Richet en France (mars 1884), Ott en Amérique (avril 1884), Aronsohn et Sachs en Suède (avril 1884), signalèrent les résultats de recherches faites à l'insu les uns des autres, et qui toutes aboutissaient à ce résultat général. Une simple piqûre profonde de la région antérieure du cerveau détermine chez le lapin une hyperthermie de 2°, sans amener d'autres troubles visibles qu'une hyperexcitabilité générale, non constante d'ailleurs (Richet).

L'hyperthermie dans ce cas est nettement due, non à une diminution de la radiation, mais à une augmentation des processus chimiques, car les mesures calorimétriques (Richet), les mesures des échanges respiratoires (Aronsohn et Sachs) indiquent une augmentation de 25 p. 100 dans la thermogenèse.

Aronsohn, Sachs et White avaient cru pouvoir localiser ce centre hyperthermisant dans les corps striés. H. Girard est moins affirmatif. Richet rejette cette localisation, trop exclusive d'après lui. Quant à Ott, il admet dans chaque hémisphère six centres thermogénétiques, quatre dans la région optostriée, deux dans la région corticale, scissure de Rolando et scissure de Sylvius. Cette multiplication même des centres confirme la non-localisation admise par Richet.

Il existe d'assez nombreuses observations cliniques d'hyperthermie qui paraissent attribuables à des lésions purement encéphaliques : 42°,5 dans le cas d'hémorragie du corps strié, 42° après fracture du crâne (Broca et Maubrac).

A côté des centres thermogénétiques ou thermo-accélérateurs, les physiologistes américains ont signalé des centres nerveux thermolytiques ou thermo-inhibiteurs. Nous résumerons cette théorie d'après Reichert.

Les deux groupes de centres thermo-accélérateurs et thermo-inhibiteurs paraissent s'associer pour gouverner un troisième groupe de centres que l'on peut appeler centres thermogéniques généraux ou automatiques, le mécanisme pouvant être schématisé ainsi :

Les centres thermogéniques généraux assurent, par leur automatisme, une dépense normale de calorique. Les petites variations dans l'activité de la thermogenèse sont sous l'influence de ces centres généraux, alors que les grandes perturbations proviennent d'une action dominante des centres spéciaux inhibiteurs ou accélérateurs sur les centres généraux, qui ont leur siège dans les cornes antérieures de la moelle.

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE SUR LES FONCTIONS ORGANIQUES

Sans entrer dans l'étude même du mécanisme, nous nous contenterons d'indiquer sommairement quelques faits à propos des modifications apportées par les variations thermiques sur le fonctionnement des principaux systèmes organiques.

Circulation. — Chez l'animal à sang froid, le rythme cardiaque est fonction de la température.

Quant aux limites compatibles avec la contraction cardiaque, elles oscillent entre 4 et 40° (Cyon), chiffres pris en faisant passer le liquide dans le cœur. Toutefois, les expériences récentes d'Athanasiu et de Carvalho reculent les limites supérieures, puisqu'ils ont pu, par le même procédé, porter le cœur de la tortue à 50° pendant vingt secondes sans tuer le cœur. Après une accélération intense, le cœur s'est arrêté pour repartir ensuite avec un rythme normal.

Cl. Bernard expliquait la mort des animaux à sang chaud par l'apparition de la rigidité du cœur vers 44 ou 45° chez les mammifères, 46 à 48° chez les oiseaux, température ultime.

Newel Martin, en expérimentant sur le cœur isolé du chien, fixe les limites entre + 16°,5 et 45°. Langendorf recule ces limites. Le cœur du lapin isolé donnerait encore, à + 7°, une contraction toutes les 100 secondes, et ils signalent un cœur se contractant à 49°. Enfin, Athanasiu et Carvalho ont observé une température de 55° dans le ventricule à la suite d'une injection, par la jugulaire d'un chien vivant, de 50 centimètres cubes d'eau à 90°. Après une accélération légère, l'animal se remit complètement, mais le temps pendant lequel ce chiffre de 55° fut observé était très court.

Sang. — Action de la température sur les élements figurés. — Les leucocytes de l'homme résistent à une température élevée. Maurel avait établi comme limite 44°, alors qu'Athanasiu et Carvalho ont vu ces éléments présenter des mouvements amiboïdes à une température de 50 degrés.

Les hématies résistent à 50° (Schultze).

Les hématies nucléées de la grenouille ne résistent pas à 42°, mais supportent la congélation.

Vaisseaux. — On connaît le rôle joué par la dilatation ou la constriction des petits vaisseaux dans la régulation thermique.

Or, Angelo Mosso soutient que ces parois ne se contractent qu'entre 3 et 40°, et qu'au delà de ces limites les fibres musculaires et les parois de vaisseaux perdent leur contractilité.

Respiration. — Les phénomènes mécaniques de la respiration sont influencés par les variations thermiques.

La respiration s'accélère avec l'élévation de température du milieu intérieur. L'accélération pouvant être considérable sous l'influence du refroidissement, après une période d'accélération passagère le rythme et l'amplitude décroissent, et chez le chien le nombre des respirations, quand l'animal a atteint la température mortelle, 22°, n'est plus que de deux ou trois par minute (Angiaux).

Nous n'insisterons pas sur les modifications si importantes des variations dans les phénomènes chimiques qui seront traitées plus complètement dans un autre chapitre.

Appareil digestif. — L'influence de la température sur toutes les fonctions digestives est indiscutable.

Les agents actifs de la digestion sont, en effet, des ferments qui perdent leur action à une certaine température en milieu humide, sont plus résistants à l'état sec, et, enfin, ont leur maximum d'activité pour une température qui

se rapproche en fait de la température propre de l'animal, tout en étant plutôt supérieure.

Au-dessous de la température optimum, les ferments, naturellement, perdent de leur autorité, et peuvent même devenir inactifs.

Un point intéressant est la différence d'optimum constatée pour les ferments ayant même action chez les hétérothermes et les homéothermes. La pepsine des mammifères est inactive à 10°, alors que celle des batraciens et des poissons, qui a son optimum à 20°, conserve une énergie remarquable vers 7 à 8degrés.

Régulation de la température. — Les causes qui peuvent tendre à modifier la température d'un animal sont de double origine.

Les unes extrinsèques : les variations du milieu ambiant ; les autres intrinsèques : les variations dans les processus chimiques qui se passent dans les tissus.

L'organisme doit lutter soit contre une accumulation de chaleur, soit contre une déperdition.

Dans l'un ou l'autre cas, l'organisme doit lutter soit contre une tendance à dépasser la température normale (hyperthermie), soit contre la tendance inverse, abaissement au-dessous du chiffre normal (hypothermie).

Les processus de défense peuvent être différents; il y a lieu d'étudier séparément la lutte contre le chaud, la lutte contre le froid.

La lutte contre le chaud a lieu :

Par dilatation cutanée (augmentation de la radiation);

Par évaporation d'eau, soit cutanée, soit pulmonaire.

La lutte contre le froid a lieu :

Par constriction cutanée;

Par augmentation de la tonicité musculaire, allant jusqu'au frisson quant aux voies sensitives.

Régulation par l'appareil vaso-moteur cutane. — La régulation par l'appareil vaso-moteur cutané paraît jouer un rôle incessant; c'est le mécanisme normal qui a pour objet d'assurer l'équilibre, quand les causes perturbatrices sont peu puissantes.

Sans insister sur le sujet qui nous entraînerait trop loin, on peut rappeler simplement quelques faits.

L'activité de la radiation périphérique est fonction de la différence de température entre la surface cutanée et celle du milieu ambiant.

La température cutanée est fonction de l'intensité de son irrigation, le sang arrivant des parties profondes étant à une température plus élevée que les régions cutanées.

Tout phénomène vaso-constricteur ayant pour effet de restreindre l'irrigation cutanée entraîne un abaissement thermique de la région et par suite une radiation moindre. Tout phénomène vaso-dilatateur agit en sens contraire.

Les manifestations vaso-motrices peuvent avoir pour origine première une impression périphérique (vaso-motricité réflexe), ou bien être déterminées par une incitation d'une partie des centres (vaso-motricité centrale).

Régulation par évaporation d'eau. — L'évaporation de l'eau est un puis-

sant moyen de lutter contre l'élévation thermique. Chaque gramme d'eau volatilisée représentera, en effet, 536 calories au moins. Deux mécanismes concourent à ce but :

L'évaporation cutanée;

L'évaporation pulmonaire.

L'évaporation cutanée n'est pas un procédé général; elle n'agit que chez les animaux dont la surface cutanée est munie de glandes sudoripares capables de sécréter, en un temps donné, une quantité de liquide appréciable : l'homme est, à cet égard, particulièrement organisé.

Bien qu'il soit imprudent d'affirmer que le rôle de la sueur comme organe de dépuration soit nul, parce que la quantité de substances dissoutes est très faible (6 grammes par litre), il n'en est pas moins certain qu'elle joue surtout un rôle important dans la régulation thermique, et que l'observation de Benjamin Franklin sur son rôle dans la régulation thermique reste indiscutable. Une évaporation de 10 grammes par heure, chiffre qui n'a rien d'exagéré, représente 5 360 calories.

Régulation par la respiration. — L'air qui sort du poumon est généralement à une température plus élevée que l'air inspiré. Mais, étant donnée la faible chaleur spécifique de l'air, ce facteur est à peu près négligeable comme agent de refroidissement. Il n'en est pas de même de l'évaporation pulmonaire.

D'après les évaluations de Richet, on peut admettre, que la perte en eau, est chez l'homme, de 1 gramme par kilogramme et par heure, soit 50 à 70 grammes pour l'homme adulte. Mais ce chiffre est singulièrement augmenté, quand la température tend à s'élever à la suite d'un travail musculaire, ou de l'élévation du milieu ambiant. Elle est doublée, et même dans quelques cas décuplée (12 grammes après une course très rapide).

Mais l'évaporation pulmonaire présente surtout une intensité maxima chez les animaux qui, comme le chien, n'ont pas d'évaporation cutanée.

Chez ces animaux, la perte d'eau, et par suite la perte de calories, atteint des chiffres extraordinaires : la respiration précipitée que l'on observe chez le chien qui a couru n'a pas d'autre but. Gad et Fick avaient déjà observé l'influence de l'élévation thermique sur le rythme respiratoire, et décrit cette accélération sous le nom de dyspnée thermique. Mais c'est Richet qui a le mieux montré le mécanisme régulateur manifesté par cette polypnée.

Ici encore, l'accélération respiratoire peut être déterminée par une mutation réflexe ou une incitation centrale. Dans ce cas, la polypnée vraie n'éclate que lorsque la température interne s'élève à 41°,5.

La perte d'eau est telle, alors, qu'elle permet à l'animal de lutter contre une élévation croissante de la température et que, si le système nerveux est intact, la température restera stationnaire, même si la cause qui avait déterminé l'élévation thermique persiste. Au contraire, si cette cause a cessé, l'animal reviendra rapidement à son chiffre normal, car la polypnée centrale, qui n'éclate qu'à 41°,5, persistera encore quelque temps, quand la température aura commencé à baisser.

Limites des températures compatibles avec la vie. — Quelles

sont les limites de température que peut supporter l'organisme vivant?

Posée ainsi, cette question ne saurait être résolue.

Les limites sont, en effet, extrêmement variables, si l'on envisage tous les sujets qui forment l'ensemble des êtres vivants, depuis le microspore jusqu'à l'animal homéotherme.

Il y a donc lieu d'étudier séparément ces sujets.

Les êtres inférieurs peuvent supporter des températures extrêmement élevées. En 1846, Flourens présenta à l'Académie des sciences des conferves qui végétaient dans une source thermale dont la température, relevée par Descloiseaux et Bunsen, était de 98°. Les observations d'algues vivantes trouvées dans des eaux ayant plus de 50° sont très nombreuses (Cohn 68°55 — ; Brewer 90°). Döllinger et Van Tieghem ont pu faire vivre des flagellés à 70 degrés.

Ces faits sont en contradiction avec l'observation de Schultze, que le protoplasme se coagule au-dessus de 47°, limites extrêmes.

En ce qui concerne les êtres inférieurs, il y a lieu évidemment de tenir compte de deux processus différents :

La mort définitive ;

L'état latent.

Il est certain que les microbes à spores peuvent se reproduire, même quand ils ont été soumis à une température supérieure à 100°, alors que la plupart voient leur vitalité s'arrêter à une température de beaucoup inférieure, oscillant entre 42 et 50 degrés.

Farhenheit, sur les conseils de Boerhaave, avait déjà indiqué qu'à 63° C. les animaux périssaient rapidement.

Berger et Delavoehe, en 1866, reprirent cette étude méthodiquement.

Cl. Bernard donne un certain nombre de chiffres qui peuvent se résumer dans le tableau suivant :

Étuve sèche.

	Température (degrés).	Mort (secondes).	Température	
			Avant.	Après.
Pigeon	90	6	44	48
Cochons d'Inde	100	5	40	44
Lapin	120	7	39	44
—	100	10	39	44,5
—	80	18	39	44
—	60	25	38	45
Chien	100	18	38	45
—	80	30	38	44,5

Étuve humide.

Lapin	80	2	40	14
—	60	3	40	45
—	45	10	40	45
Chien	»	»	»	»

D'une manière générale, la résistance des êtres vivants aux températures élevées est d'autant plus grande que la quantité d'humidité est plus faible.

Les découvertes récentes sur la fabrication en grand des mélanges réfrigérants ont permis d'étudier l'action du froid dans des conditions toutes nouvelles.

Richet a réussi à congeler des poissons dans des blocs de glace et à abaisser la température à —15° sans supprimer la vie. En ayant soin, en effet, de procéder lentement au refroidissement, puis au réchauffement, on voit les poissons se remettre à nager :

Le tableau suivant indique les froids supportés.

	Résistance.	Mort définitive.
Poissons	— 85°	— 20°
Grenouilles	— 28	— 30
Serpents	— 25	— 35
Scolopendres	— 50	— 90
Escargots	— 110	
Protozoaires, microbes	— 200	

Les animaux à sang chaud ne présentent évidemment pas une résistance analogue. Il est curieux cependant de voir un chien maintenir sa température normale pendant plus d'une heure dans le puits frigorifique à —92°. Mais ensuite, la résistance est vaincue, et la température baisse rapidement, la mort arrivant vers 22° après deux heures à — 92 degrés.

CALORIMÉTRIE

Par C. SIGALAS

MÉTHODES ET APPAREILS

La calorimétrie est la mesure des quantités de chaleur dégagées ou absorbées dans les différents phénomènes, d'ordre physique ou chimique, dont peuvent être le siège les différents corps bruts ou animés.

D'après la nature même des phénomènes auxquels elle s'applique, on peut établir la division suivante :

I. *Calorimétrie physique*, ayant pour objet la mesure des quantités de chaleur dégagées ou absorbées par les corps lorsqu'ils sont le siège de *variations de température* ou de *changements d'état*.

II. *Calorimétrie chimique*, ou mesure des quantités de chaleur dégagées ou absorbées dans les *réactions chimiques*.

III. *Calorimétrie biologique*, ou mesure des quantités de chaleur dégagées ou absorbées par les *êtres vivants*.

UNITÉS CALORIMÉTRIQUES. — DÉFINITIONS

Unité de quantité de chaleur : calorie. — C'est la quantité de chaleur nécessaire pour faire varier de 0° à 1°, ou de 1° à 0°, la température de l'unité de poids d'eau distillée.

Si on prend comme unité de poids le gramme, on a l'unité C. G. S. de chaleur : calorie-gramme-degré ou petite calorie : cal. (gr.-deg.).

Si on prend comme unité de poids le kilogramme, on a la calorie-kilogramme-degré ou grande calorie : cal. (kil.-deg.).

Telles sont les *unités métriques* de chaleur. Elles sont presque universellement adoptées.

Unités britanniques de chaleur. — Elles diffèrent des précédentes par le choix de l'unité de masse (*pound*, *grain*), et de l'unité de température (*degré Fahrenheit*). Comme on les rencontre souvent dans les mémoires anglais de médecine et de physiologie (1), nous donnons ci-dessous un

(1) Voy. Ch. Richet, *Travaux de laboratoire*, I, p. 154.

tableau comparatif qui permet d'effectuer rapidement la transformation des chiffres exprimés dans l'un et l'autre systèmes.

Unités métriques et britanniques de chaleur.

Unités.	Calorie gramme-degré.	Calorie kilog.-degré.	Pound degré F.	Grain degré F.
Calorie (g.-deg.).........	1	0,001	0,003 968	27 77
— (kil.-deg.).......	1 000	1 000	3,9682	27 770
Pound-degré F..........	252,00	0,252	1	7000
Grain-degré F..........	0,03601	$3{,}6 \times 10^{-5}$	$\frac{1}{7000}$	1

Puissance calorifique. — En calorimétrie biologique, on définit le *pouvoir calorifique* ou *thermogène* d'un être vivant : *le nombre de calories produites par l'unité de poids dans l'unité de temps :*

$$\pi = \frac{Q}{p.\tau}.$$

Ordinairement, on exprime les quantités de chaleur (Q) en *grandes calories* et on prend comme unité de poids le *kilogramme* et comme unité de temps l'*heure* : l'*unité pratique* de puissance calorifique est alors la calorie (kil.-deg.) par kilo-heure.

On utilise aussi quelquefois la calorie (gr.-deg.) par kilo-heure, unité mille fois plus petite que la précédente.

Pouvoir rayonnant. — Lorsqu'une source de chaleur est placée dans une enceinte de température inférieure à la sienne, la quantité de chaleur rayonnée, régie par la loi de Newton, est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à sa surface. Cette loi s'applique aux êtres vivants.

Pour les comparer entre eux au point de vue de la radiation calorifique, il devient nécessaire de faire intervenir la notion de surface. Aussi exprime-t-on l'intensité de radiation calorifique d'un animal par le *nombre de calories dégagées dans l'unité de temps par unité de surface.*

En prenant comme unité de chaleur la calorie (gr.-deg.), comme unité de temps l'heure, et comme unité de surface le centimètre carré, on a pour *unité pratique* de pouvoir rayonnant : la calorie (gr.-deg.) par heure et par centimètre carré.

Mesure de la surface. — L'évaluation directe de la surface d'un animal étant toujours très longue et très difficile, on a recours le plus souvent à des formules empiriques permettant de la calculer en fonction du poids.

Formule de Meeh (1). — C'est une des plus employées :

$$S = K\sqrt[3]{P^2}.$$

Le coefficient K varie avec l'espèce animale.

(1) Meeh, *Anat. physik. und physiol. Daten und Tabellen* de Vierordt, p. 36, 1893.

Pour le lapin :

$$K = 11,16.$$

Pour l'homme :

Adultes : $K = 12,3.$

Enfants : $K = 11,97.$

Formule de M. Bouchard (1). — La formule de Meeh a été reconnue par M. le professeur Ch. Bouchard à peu près exacte pour l'homme très maigre, mais inexacte pour la femme et pour les sujets de corpulence moyenne ou forte.

D'un grand nombre de mesures directes de surfaces effectuées sur différents sujets, ce savant a déduit la formule suivante qui tient compte de trois mesures commodes à faire sur l'homme : le poids P, la taille H et le tour de taille C :

$$S = \alpha.C.H + \beta.\frac{P}{C} + \gamma H \sqrt[2]{\frac{P}{3,14H}}.$$

α, β et γ sont des coefficients qui varient avec le sexe et avec le *degré de corpulence*; ce dernier étant défini : *le quotient* $\left(\frac{P}{H}\right)$ *du poids (en kilogrammes) par la taille (en décimètres).*

Pour l'*homme normal moyen*, l'auteur indique :

$$\frac{P}{H} = 4,2; \qquad \alpha = 0,48; \qquad \beta = 8,33; \qquad \gamma = 3,47.$$

Pour la *femme normale moyenne* :

$$\frac{P}{H} = 3,9; \qquad \alpha = 0,48; \qquad \beta = 6,64; \qquad \gamma = 3,03.$$

Coefficient de partage thermique. — La chaleur perdue par un animal dans un temps donné est la somme : 1° de la quantité de chaleur dégagée à la surface de la peau; et 2° de la quantité de chaleur dégagée à la surface du poumon.

Le *coefficient de partage thermique* est le rapport entre ces deux quantités.

§ I. — CALORIMÉTRIE PHYSIQUE

Renvoyant aux traités de physique pour l'étude des méthodes calorimétriques générales, nous nous bornerons à donner ici les procédés utilisables pour la mesure des chaleurs spécifiques des tissus et des liquides organiques et les résultats numériques s'y rapportant, résultats utiles à connaître pour résoudre certains problèmes de physiologie.

(1) Bouchard, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, t. CXXIV, p. 844-851.

Chaleur spécifique des tissus et liquides organiques.

La chaleur spécifique (moyenne) d'un corps est la quantité de chaleur, exprimée en calories, nécessaire pour faire varier de 1 degré la température de l'unité de poids de ce corps.

On la détermine le plus souvent par la *méthode des mélanges* à l'aide d'appareils spéciaux appelés *calorimètres*.

L'appareil de M. BERTHELOT représenté figure 509 se prête admirablement à des mesures précises dans les divers cas qui peuvent se présenter.

L'*étuve d'échauffement* (fig. 510) permet de porter le corps dont on veut déterminer la chaleur spécifique à la température fixe voulue, avant de l'immerger dans le liquide calorimétrique dont l'élévation de température, exactement mesurée après mélange, suffit pour calculer le résultat cherché.

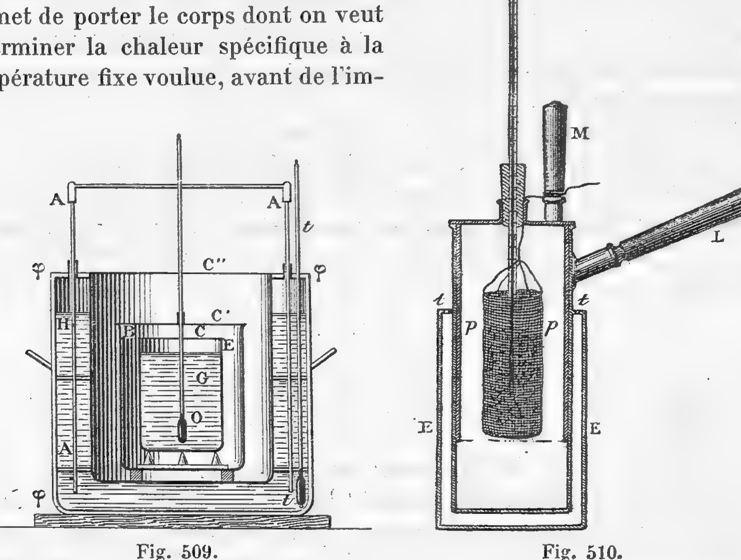


Fig. 509. Fig. 510.

A. **Tissus organiques.** — Il est nécessaire de tenir compte, pour la plupart des corps organisés :

1° De leur altérabilité possible par l'eau lors de l'immersion dans le calorimètre (dissolution de quelques-uns de leurs principes constituants...) ;

2° De leur altérabilité à l'air lors de l'échauffement (évaporation d'eau, coagulation...) ;

3° De leur mauvaise conductibilité pour la chaleur, susceptible de rendre incertaine la mesure de leur température aussi bien avant qu'après le mélange.

La première cause d'erreur sera évitée :

1° En enfermant le corps dans une petite boîte close de platine mince dont on connaît le *poids en eau* (poids × chaleur spécifique) ;

2° Dans certains cas, en remplaçant l'eau du calorimètre par un liquide n'altérant pas le tissu et de chaleur spécifique connue, par exemple la *solution physiologique* à 7 p. 1000 de chlorure de sodium.

Pour éviter l'altération du tissu par l'échauffement, on devra se tenir toujours dans les limites de température compatibles avec son intégrité (aux environs de 37°), et introduire dans la boîte en platine dont il vient d'être parlé une quantité de liquide sans action sur le tissu, suffisante pour le recouvrir complètement. Il n'y aura qu'à tenir compte, dans le calcul, du poids en eau du liquide ajouté.

Dans certains cas, il sera préférable de *refroidir* le corps au lieu de l'échauffer. On observera après le mélange dans ces conditions un *abaissement* de température, dont la détermination suffira pour le calcul du résultat.

Enfin, la cause d'erreur résultant de la mauvaise conductibilité thermique sera réduite au minimum si on a le soin de diviser le tissu en petits fragments de la grosseur d'un pois.

Soit P le poids du tissu enfermé dans une corbeille en platine dont le *poids en eau* est π_1 et porté, dans l'étuve d'échauffement (ou dans l'*enceinte frigorifique*), à une température fixe t_1. Si, après immersion dans le calorimètre, de poids en eau π_2 et de température t_2, on observe, pour le mélange, une température finale θ, on aura évidemment :

$$(\mathrm{P}x + \pi_1)(t_1 - \theta) = \pi_2(\theta - t_2)$$

d'où :

$$x = \frac{\pi_2(\theta - t_2) - \pi_1(t_1 - \theta)}{\mathrm{P}(t_1 - \theta)}.$$

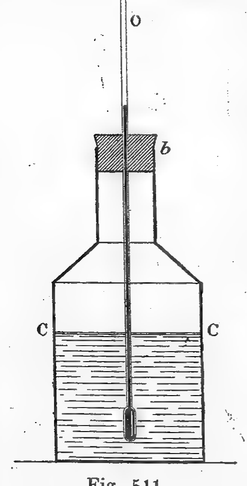


Fig. 511.

B. **Liquides organiques.** — Trois procédés peuvent être mis en pratique : l'un appliquant la *méthode des mélanges*, l'autre la *méthode du refroidissement*, le troisième la *méthode du réchauffement*.

a. Méthode des mélanges. — Le liquide est introduit dans une bouteille de platine mince de 50 à 100 centimètres cubes de capacité de façon à la remplir aux deux tiers environ. Dans le col de cette fiole est fixé, à l'aide d'un petit bouchon de liège, un thermomètre sensible (fig. 511).

Cela fait, on chauffe (ou on refroidit le système) en le maintenant dans une enceinte à température convenable et l'agitant constamment.

Lorsque le thermomètre marque le degré voulu, on en saisit la tige avec la main ; on agite encore et on fait une dernière lecture ; puis on immerge brusquement la bouteille dans le calorimètre. Avec la bouteille elle-même, grâce à la portion extérieure de la tige thermométrique tenue à la main, ont

agite l'eau du calorimètre, tout en observant les températures. Lorsque la différence entre les températures marquées par les deux thermomètres est inférieure à 1° (après deux ou trois minutes, généralement), on retire la bouteille immédiatement après avoir lu les deux températures. On possède alors tous les éléments pour le calcul de la chaleur spécifique cherchée :

Soient :

- P, x et t, le poids, la chaleur spécifique et la température initiale du liquide ;
- π_1, le poids en eau du système : bouteille + thermomètre + bouchon (1) ;
- t', la température du liquide au moment où on l'a enlevé du calorimètre ;
- π_2, le poids en eau du calorimètre ;
- θ et θ', ses températures initiale et finale.

On a :

$$(Px + \pi_1)(t - t') = \pi_2(\theta' - \theta),$$

d'où :

$$x = \frac{\pi_2(\theta' - \theta) - \pi_1(t - t')}{P(t - t')}.$$

Correction du refroidissement. — Cette correction relative à l'influence du milieu ambiant sur l'échauffement ou le refroidissement du calorimètre peut être faite par différentes méthodes décrites dans les traités classiques (RUMFORD, REGNAULT, BERTHELOT, etc.).

M. BERTHELOT a montré que cette influence devient négligeable lorsque, opérant avec un calorimètre bien protégé par des enceintes d'eau, l'excès de température ne dépasse pas 3 degrés et que l'expérience ne dure pas plus de trois minutes, la température ambiante demeurant inférieure à 20 degrés.

b. MÉTHODE DU REFROIDISSEMENT. — Elle consiste à placer successivement dans un même récipient (en platine) un liquide de chaleur spécifique connue et le liquide dont on cherche la chaleur spécifique, et à observer, à l'aide d'un chronomètre à seconde, les temps mis par les deux systèmes pour se refroidir, dans une même enceinte, d'un même nombre de degrés.

Soient π_1 et π_2 les poids en eau des deux systèmes, τ et τ' les durées du refroidissement, on a :

$$\frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{\tau}{\tau'}$$

expression de laquelle on déduit aisément le résultat cherché.

On arrive à plus d'exactitude en cherchant, par tâtonnements, le poids du liquide qui donne la même durée de refroidissement que le liquide de chaleur spécifique connue auquel on le compare. La chaleur spécifique cherchée s'obtient alors en divisant le poids en eau du second par le poids du premier.

(1) La chaleur spécifique du liège est 0,35.

c. Méthode du réchauffement. — Le principe de la méthode, récemment décrite par M. Negreano (1), repose sur la comparaison des temps nécessaires pour élever du même nombre de degrés des volumes égaux d'eau et d'un liquide quelconque, quand ils sont chauffés par le passage d'un même courant électrique. Voici comment il convient d'opérer : Dans le circuit d'un accumulateur on intercale une spirale métallique et une résistance auxiliaire, réglable à volonté. La spirale est introduite dans une éprouvette en verre où l'on met successivement, jusqu'au même niveau, l'eau et le liquide dont on cherche la chaleur spécifique. Un thermomètre sensible est placé au milieu de la spirale. Le liquide étant placé dans l'éprouvette et le courant traversant la spirale 1, on note les temps, évalués en secondes, pendant lesquels la température s'élève progressivement. A partir d'un moment donné et pendant une certaine durée, les temps nécessaires pour que les températures s'élèvent d'un même nombre de degrés sont égaux. Dans ce cas, les quantités de chaleur q cédées par le courant à l'éprouvette en verre et au thermomètre sont presque nulles.

Si p est le poids du liquide en grammes, x sa chaleur spécifique, θ l'élévation de température, t, le temps en secondes, on peut écrire :

$$q = \frac{1}{J} i^2rt = px\theta. \qquad (1)$$

L'eau étant ensuite versée dans l'éprouvette jusqu'au même niveau, on opère d'une façon analogue et on observe les temps t' pendant lesquels les températures s'élèvent d'un même nombre de degrés θ', on a :

$$q' = \frac{1}{J} i^2rt' = p'\theta' \qquad (2)$$

p' étant le poids de l'eau en grammes.

Divisant (1) par (2) :

$$\frac{t}{t'} = \frac{px\theta}{p'\theta'}$$

équation d'où l'on déduit la chaleur spécifique cherchée x.

Résultats. — Les recherches faites sur la chaleur spécifique des tissus et liquides de l'organisme sont peu nombreuses.

Voici quelques chiffres :

Tissus et liquides organiques.	Chaleur spécifique.	Observateurs.
Os compacts	0,03	Rosenthal (1878) (2)
Os spongieux	0,71	Id.
Tissu adipeux	0,712	Id.
Muscles striés	0,825	Id.
Sang artériel	1,031	Id.
Sang veineux	0,892	Id.
Sang défibriné	0,927	Id.

(1) *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1899, p. 875.

(2) Rosenthal, *Arch. für Anatomie und Physiologie, physiologische Abtheilung*, 1878, p. 215.

Tissus et liquides organiques.	Chaleur spécifique.	Observateurs.
Sang humain normal........	0,710	W.-F. Lloyd (1) (1897)
Sang humain artériel.......	0,8724	Hillerson et Stein-Berstein (1898) (2)
Sang humain veineux.......	0,8708	Id.
Sérum sanguin.............	0,9401	Id.
Sang de mouton défibriné...	0,872	Berthelot (3) (1889)
Lait (de vache)............	0,992	?

M. Berthelot a trouvé (3) que la chaleur spécifique du sang varie avec sa composition : étant donné un sang qui renferme p millièmes d'eau et p' millièmes de matières fixes ($p+p'=1000$), on peut admettre comme première approximation de c la valeur : $p+0,4\,p'$.

Chaleur spécifique du corps humain. — On a longtemps admis que la chaleur spécifique du corps humain pris en totalité était égale, très sensiblement, à l'unité. D'après Liebermeister, on doit prendre comme valeur moyenne le chiffre 0,83. Quelques physiologistes adoptent 0,9 (4).

§ II. — CALORIMÉTRIE CHIMIQUE

On sait aujourd'hui que la *chaleur animale* résulte en majeure partie de la chaleur produite par les phénomènes d'oxydation, de réduction, d'hydratation et de dédoublement qui se poursuivent incessamment dans l'intimité des tissus, et qu'une part (le 1/7 environ) est produite dans le poumon par la combinaison de l'oxygène avec l'hémoglobine : en dernière analyse, la *chaleur totale* produite dans un temps donné par un être vivant est la somme des quantités de chaleur correspondant à la combustion, ou mieux à la série des transformations vitales des *aliments* ou des *réserves* consommés pendant le même temps (Berthelot).

Bien que ces questions soient plutôt du domaine de la chimie biologique, nous rappellerons ici :

1° Les principes fondamentaux de la *thermochimie* sans lesquels on ne peut aborder l'étude de la chaleur animale ;

2° La méthode de détermination de la chaleur de combustion des composés organiques pouvant entrer dans l'alimentation ou dans la composition des tissus, avec un tableau des résultats numériques relatifs aux principaux composés ;

3° Le principe de la méthode qui a servi à la mesure de la chaleur dégagée par l'oxydation de l'hémoglobine du sang.

1. — Principes de thermochimie.

M. Berthelot a établi les trois principes fondamentaux suivants :

I. ***Principe des travaux moléculaires.*** — La quantité de chaleur

(1) W.-F. Lloyd, *British medical Journal*, n° 1920.
(2) Travail du laboratoire du professeur Louguinine. Moscou, 1898.
(3) Berthelot, *C. R. de l'Académie des sciences*, 1889, t. II, p. 776-781.
(4) A. Waller, *Éléments de physiologie*, 1898, p. 328.

dégagée dans une réaction quelconque mesure la somme des travaux physiques et chimiques accomplis dans cette réaction.

II. ***Principe de l'équivalence calorifique des transformations chimique*** ou ***principes de l'état initial et de l'état final.*** — Si un système de corps simples ou composés, pris dans des conditions déterminées, éprouve des changements physiques ou chimiques, capables de l'amener à un nouvel état, sans donner lieu à aucun effet mécanique extérieur au système, la quantité de chaleur dégagée ou absorbée par l'effet de ces changements dépend uniquement de l'état initial et de l'état final du système ; elle est la même quelles que soient la nature et la suite des intermédiaires.

III. ***Principe du travail maximum.*** — Tout changement chimique accompli sans l'intervention d'une énergie étrangère, tend vers la production du corps ou du système de corps qui dégage le plus de chaleur (1).

2. — Chaleur de combustion des substances pouvant entrer dans l'alimentation ou la composition des différents tissus.

La *puissance thermogène* des composés organiques, ou, pour mieux dire, leur potentiel énergétique, a pour mesure leur *chaleur de combustion.* De même, en effet, que la combustion de la houille dans les machines industrielles est l'origine du travail qu'elles fournissent, de même les êtres vivants tirent leur source unique d'énergie des réactions chimiques multiples qui s'accomplissent au sein de leurs tissus.

Pour les substances ternaires $C^xH^yO^z$, la puissance thermogène sera fournie directement par la *chaleur de combustion* ou *nombre de calories dégagées par la combustion complète de 1 gramme de substance*; car, en définitive, ces substances *brûlent* dans l'organisme comme dans le calorimètre, en donnant de l'acide carbonique et de l'eau.

Pour les composés azotés ($C^xH^yO^zAz^u$, etc.), la combustion dans l'économie animale n'est pas complète ; elle s'arrête à la production de composés amidés plus ou moins complexes (urée, acide urique, acide hippurique, etc.).

Pour l'homme, on admet, en pratique, que tout l'azote albuminoïde s'élimine sous forme d'*urée*. Comme l'urée qui se forme aux dépens des matières albuminoïdes est environ 1/3 de leur poids, on doit retrancher de la *chaleur de combustion totale* de chacune de ces substances un tiers de la chaleur de combustion de l'urée, pour avoir la valeur de leur *chaleur de combustion organique.*

Méthode de la bombe calorimétrique. — Cette méthode, imaginée par Berthelot, a permis la détermination précise de la chaleur de combustion d'un grand nombre de composés organiques.

L'*appareil* représenté figure 512 se compose d'un récipient en acier pouvant résister à une pression de 200 à 300 atmosphères et dont la paroi interne

(1) Pour l'extension de ces principes au cas des réactions complexes qui s'effectuent au sein des organismes vivants, nous renvoyons aux ouvrages de M. Berthelot : *Essai de mécanique chimique*, chapitre *Chaleur des êtres vivants*, — et *Chaleur animale*, in Encyclopédie Léauté, 1899.

est recouverte d'un émail particulier, inattaquable par les acides et l'oxygène humide (*Mahler*).

Le couvercle, exactement ajusté par adhérence ou grâce à un écrou à vis, est muni d'une tubulure centrale permettant de relier la bombe à un récipient d'oxygène comprimé, et d'une tubulure latérale obturée par un ajutage d'ivoire isolant traversé par un fil de platine destiné à amener un courant électrique à une spirale de fil de fer de 1/10 de millimètre de diamètre. Cette spirale, portée à l'incandescence au moment voulu, mettra le feu à la

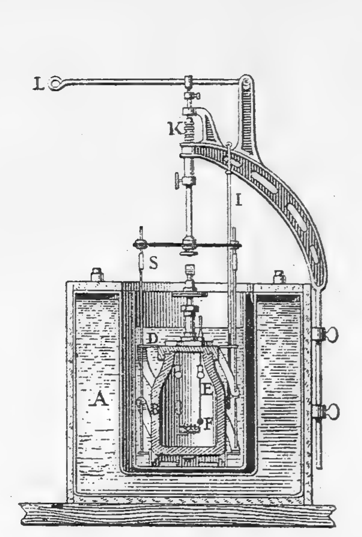


Fig. 512.

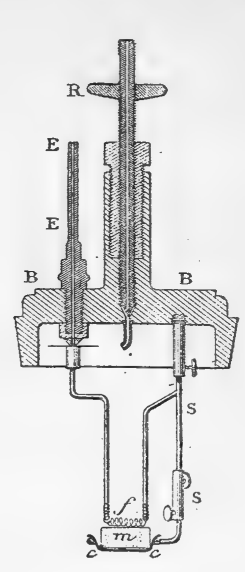


Fig. 513.

substance dont on cherche la chaleur de combustion préalablement placée dans une petite capsule *cc* fixée à l'extrémité inférieure du support SS (fig. 513).

Détails opératoires. — Si la matière à brûler est solide et fixe, on la comprime dans un moule sous forme de petites pastilles, et, après l'avoir pesée, on la dépose dans la capsule *cc*; s'il s'agit d'un composé liquide et volatil, on l'enferme dans un récipient dont le fond est une petite capsule de platine, et la partie supérieure une pellicule de collodion. On détermine séparément, par des pesées successives, les poids de platine, de collodion (1) et de liquide.

Cela fait, et la spirale de fer (de poids et de chaleur de combustion connus) étant amenée au contact du corps à brûler, on ferme hermétiquement la bombe, on y comprime l'oxygène à 25 atmosphères, et on la plonge entièrement dans l'eau du calorimètre. Quand l'équilibre de température s'est établi, on fait passer le courant électrique : la spirale prend feu et allume la substance. On opère dans un tel excès d'oxygène que la combustion est instantanée et complète (absence de noir de fumée, d'oxyde de carbone et de gaz

(1) Un gramme de coton nitrique dégage 2782 cal. en brûlant dans l'oxygène.

hydrocarbonés). On suit attentivement la marche du thermomètre calorimétrique qui atteint son maximum au bout de deux ou trois minutes.

La valeur en eau de la bombe a pu être déterminée expérimentalement en brûlant, dans une expérience préalable, faite dans les mêmes conditions que la précédente, un poids déterminé d'un corps de chaleur de combustion connue.

On a alors tous les éléments nécessaires pour calculer le résultat cherché.

Résultats. — Les tableaux qui suivent se rapportent aux principales substances organiques entrant dans l'alimentation ou dans la composition des tissus.

a. Corps organiques non azotés (1).

Substances.	Formules.	Chaleur de combustion. — Cal. (kil.-deg.) dégagées par la combustion de 1 gr. de substance.
Alcool éthylique	C^2H^6O	7.054 (B)
Glycérine	$C^3H^8O^3$	4.261 (B) 4.305 (St)
Glucose anhydre et isomères	$C^6H^{12}O^6$	3.739 (B) — 3.939 (St)
Amidon	$n(C^6H^{10}O^5)$	4.227 (B) — 4.116 (St)
Glycogène	»	4.187
Saccharose et isomères	$C^{12}H^{22}O^{11}$	3.962 (B) — 4.176 (D)
Lactose (anhydre)	$C^{12}H^{22}O^{11}$	4.162 (B)
Dextrine	$n(C^6H^{10}O^5)$	4.117 (B)
Cellulose	$C^6H^{10}O^5$	4.209 (B)
Inosite	$C^6H^{12}O^6$	3.702 (B)
Inuline	$n(C^6H^{10}O^5)$	4.184 (B)
Graisse d'homme et de différents animaux	»	9.372 (St)
Beurre	»	9.179 (St)
Huile d'olives	»	9.355 (St)

b. Corps organiques azotés.

Substances.	Formules.	Chaleurs de combustion — combustion totale.	en tenant compte de l'urée formée.
Urée	CH^4Az^2O	2,690 (B) — 2,537 (D)	0,000
Acide hippurique	$C^9H^9AzO^3$	5,569 (B)	5,490
Acide urique	$C^5H^4Az^4O^3$	2,747 (B) — 2,620 (St)	1,040 (B)
Albumine d'œuf	»	5,687 (B) — 5,577 (St)	4,857 (B)
Jaune d'œuf sec	»	8,124 (B)	7,704
Fibrine du sang	»	5,529 (B) — 5,508 (St)	4,749 (B)
Hémoglobine	»	5,914 (B) — 5,949 (D)	4,964 (B)
Gluten	»	5,994 (B)	5,245
Caséine	»	5,717 (St)	4,821
Osséine	»	5,414 (B)	4,546
Vitelline	»	5,784 (B)	4,954

On admet, comme moyennes, pour la *chaleur cédée à l'organisme par 1 gramme de substance,* les valeurs suivantes :

Corps gras	9,400 calories.
Hydrates de carbone	4,100 —
Albuminoïdes	4,100 —

(1) B = Berthelot; St = Stohmann; D = Danilewski.

D'après ces chiffres, la valeur thermogène ou énergétique d'une ration pourra être aisément calculée si on en connaît la composition exacte. Le tableau suivant a été établi d'après les données de KÖNIG et STUTZTER (1).

c) Chaleur de combustion des principaux aliments pour 100 grammes de matière.

Substances alimentaires.	Calories (kil.-deg.) pour 100 grammes.	Substances alimentaires.	Calories (kil.-deg.) pour 100 grammes.
Lait naturel	67,500	Bœuf ou mouton gras	337,00
— écrémé	40,000	Viande de porc grasse	400,00
— battu	41,500	Oie grasse	345,00
Crème	232,00	Langue de bœuf fumée	396,00
Beurre	825,00	Cervelas	446,00
Huile	930,00	Jambon	437,00
Lard	748,00	Chair de poulet ou pigeon (crue)	100,00
Fromage gras	425,00	Carpe	93,00
— maigre	320,00	Anguille	312,00
Jaune d'œuf	356,00	Saumon frais	150,00
Œuf de poule	144,00	— fumé	210,00
Pain blanc	260,00	Brochet	72,00
Pain de seigle	218,00	Buccin	95,00
Biscuits anglais	420,00	Merluche	61,50
Bœuf maigre (cru)	119,00	Perche	76,00
— (cuit)	215,00	Épinards	39,50
— (bouilli)	209,00	Haricots (purée)	193,00
Côtelettes de veau crues	142,50	Choux-raves	45,00
— cuites	230,00	Carottes	41,00
Cervelle de veau (crue)	142,5		
Ris de veau	230,00		

3. — Méthode de mesure de la chaleur dégagée par la combinaison de l'hémoglobine du sang avec l'oxygène.

M. BERTHELOT s'est servi pour cette détermination de la *fiole calorimétrique* représentée figure 514.

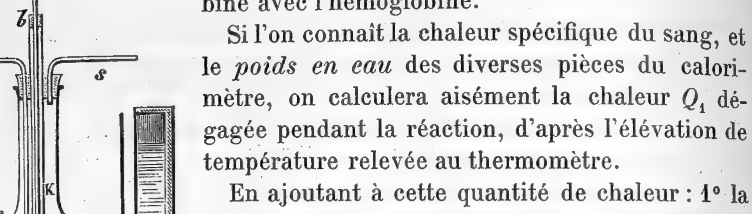
Pour mesurer la chaleur produite par la combinaison de l'O avec l'hémoglobine *et pour ne mesurer qu'elle*, il a procédé de la façon suivante :

1° ***Passage d'un gaz inerte.*** — Un poids déterminé de sang défibriné, conservé pendant vingt-quatre heures en vase clos dans le laboratoire, est d'abord introduit dans la fiole par une pression d'azote (tube t). On fait alors passer à travers le sang un courant d'azote saturé d'humidité, en agitant la fiole et en notant la température de minute en minute. A sa sortie, le gaz passe à travers un tube à ponce sulfurique qui retient la vapeur d'eau et à travers un tube à chaux sodée qui retient l'acide carbonique. Après quinze minutes environ, on pèse la fiole et les deux tubes séparément. Cette première expérience a pour but de déterminer les quantités de chaleur absorbées par le dégagement de vapeur d'eau et d'acide carbonique entraînés par le courant gazeux.

2° ***Passage de l'oxygène.*** — Dans des conditions semblables à celles de l'essai précédent, on fait passer un courant d'oxygène pur, pendant le même

(1) MUNK et EWALD, *Traité de diététique*, p. 596.

temps. Le sang redevient rutilant. On remplace l'oxygène gazeux de la fiole et des tubes à ponce et à chaux sodée par de l'azote et on pèse à nouveau la fiole et chaque tube.



L'augmentation de poids de la fiole permet, en tenant compte de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique entraînés, d'avoir exactement le *poids de l'oxygène* qui s'est combiné avec l'hémoglobine.

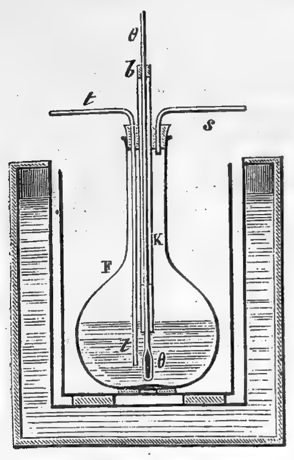


Fig. 514.

Si l'on connaît la chaleur spécifique du sang, et le *poids en eau* des diverses pièces du calorimètre, on calculera aisément la chaleur Q_1 dégagée pendant la réaction, d'après l'élévation de température relevée au thermomètre.

En ajoutant à cette quantité de chaleur : 1° la chaleur q_1 qui a été absorbée par la vaporisation de l'eau ($q_1 = 606^{cal},5 - 0,7 \times t$, *pour un gramme*) ; 2° la chaleur q_2 absorbée par le dégagement de l'acide carbonique (1), chaleur qu'on peut supposer, sans erreur sensible, égale à celle dégagée par la dissolution dans l'eau d'un poids égal de ce gaz ($1^{cal},21$ pour 1 gramme), on a, pour la chaleur C correspondante à la combinaison du poids ci-dessus déterminé d'oxygène avec l'hémoglobine :

$$C = Q_1 + q_1 + q_2$$

Opérant comme il vient d'être dit, et rapportant les chiffres trouvés à 32 grammes, poids moléculaire de l'oxygène, M. Berthelot a trouvé :

$$C = +15^{cal},19$$

Pour l'*oxyde de carbone*, le même auteur a trouvé, pour $C^2O^2 = 28$ grammes :

$$C = +18^{cal},66.$$

§ III. — CALORIMÉTRIE BIOLOGIQUE

La mesure de la chaleur produite par les êtres vivants dans un temps donné peut être faite par deux méthodes différentes :

1° *Indirectement* et à l'aide des données thermo-chimiques, par la détermination des combustions et des transformations chimiques accomplies dans un temps donné par l'animal pris en état d'équilibre parfait, c'est-à-dire n'augmentant ni ne diminuant de poids pendant l'expérience ;

2° *Directement*, par la mesure calorimétrique de la quantité de chaleur dégagée par l'animal dans des conditions déterminées.

Nous ne nous occuperons ici que des *méthodes de calorimétrie directe*.

(1) Des expériences comparatives ont montré que les quantités d'acide carbonique et de vapeur d'eau entraînées par le courant gazeux sont proportionnelles à ce courant, aussi bien pendant le passage de l'oxygène que pendant celui de l'azote.

Conditions générales des recherches calorimétriques en biologie. — Voici, d'après M. d'Arsonval (1), l'ensemble des conditions d'ordre physique et physiologique que doit présenter une méthode parfaite de calorimétrie animale :

1° *Il faut avant tout que l'animal soit dans un milieu dont la température ne change pas pendant l'expérience.*

C'est d'abord le seul moyen d'étudier l'action de la température du milieu ambiant sur la thermogenèse, et de pouvoir, en second lieu, faire des expériences comparatives.

Cette condition est d'une nécessité absolue lorsqu'on veut étudier les phénomènes thermiques durant l'incubation des œufs d'oiseaux ou ceux relatifs aux différentes fermentations.

2° *Le milieu gazeux où respire l'animal doit avoir une composition constante*, mais pouvant varier d'une expérience à l'autre.

3° *L'expérience doit pouvoir se poursuivre pendant un temps aussi long qu'on le désire*; on élimine ainsi soit les causes d'erreur accidentelles, soit les coïncidences heureuses.

On doit avoir :

4° *La certitude de mesurer toute la chaleur dégagée par l'animal.*

5° *La certitude de ne mesurer qu'elle.*

6° *La possibilité d'enregistrer automatiquement, et sans correction, les calories dégagées.*

Nous verrons, dans l'exposé qui va suivre des principales méthodes utilisées par les physiologistes, combien peu réunissent cet ensemble de conditions, dont l'énumération préalable rendra plus facile, dans chaque cas, la critique de la technique expérimentale suivie.

Classification des méthodes de calorimétrie directe. — Dans tous les appareils utilisés en calorimétrie animale, la source de chaleur (animal) dont il s'agit de mesurer le pouvoir calorifique est disposée de façon à provoquer des variations thermiques sur un corps convenablement choisi, *corps calorimétrique*. La mesure exacte de ces variations, ou d'un effet mesurable de ces variations, conduit au résultat cherché.

D'après la *nature* même du corps calorimétrique, et sans tenir compte des différents moyens de mensuration des variations thermiques qu'il éprouve du fait de la source à mesurer, on peut établir, pour la commodité de l'étude, la classification suivante :

A. Appareils à corps calorimétrique *solide*;
B. — à corps calorimétrique *liquide*;
C — à corps calorimétrique *gazeux*.

A. — Appareils à corps calorimétrique solide.

Calorimètre de Lavoisier et Laplace (2). — *Principe.* — Le corps calorimétrique est la *glace*. Toute la chaleur produite par la source est employée

(1) *Travaux du laboratoire de M.* Marey, 1879, p. 400 et suiv.
(2) C'est Lavoisier qui détermina le premier par calorimétrie directe la quantité de chaleur dégagée par un animal.

à la faire entrer en *fusion* : le produit du poids (P) de glace fondue par sa *chaleur de fusion* (L = 79,25 calories) donne la quantité de chaleur dégagée :

$$Q = P \times L.$$

L'appareil représenté figure 515 comprend trois cavités concentriques limitées par des parois métalliques :

La première A est vide et sert à loger l'animal ; ses parois sont à claire-voie. Elle est fermée à sa partie supérieure par un couvercle H.

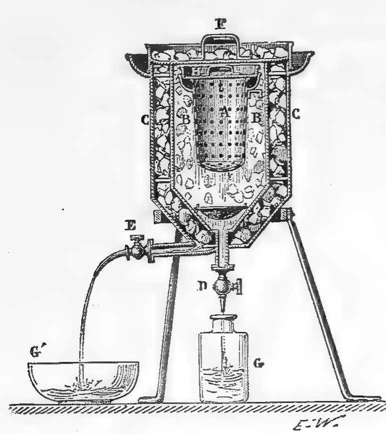


Fig. 515.

La seconde B est remplie de glace à 0° ; elle est munie, à sa partie inférieure, d'un tube à robinet D, permettant de recueillir la glace fondue dans le vase G.

La troisième enceinte C, isolée de la seconde, et remplie aussi de glace fondante, communique avec le robinet E ; elle a pour but de mettre la deuxième cavité à l'abri de l'influence de la température ambiante afin que la glace qu'elle contient ne soit fondue que par la chaleur cédée par l'animal placé dans l'enceinte intérieure. Dans le même but, le couvercle F qui sert à fermer l'appareil est aussi recouvert de glace fondante.

Défectuosités de la méthode. Objections. — Au point de vue physique, il est très difficile, on peut même dire impossible, d'évaluer exactement le poids de glace fondue : une quantité d'eau, variable d'ailleurs, est toujours retenue aussi bien entre les fragments de la glace elle-même que sur les parois de la seconde enceinte. Cette erreur, inhérente à la méthode, est encore multipliée par le facteur constant 79,25 (1).

Au point de vue physiologique, la méthode est défectueuse :

1° Parce que l'animal est enfermé dans une enceinte confinée dont l'atmosphère se vicie d'autant plus que l'expérience dure plus longtemps ;

2° Parce que, maintenu immobile dans une enceinte métallique à 0°, l'animal se refroidit considérablement à la fois par rayonnement et par conductibilité.

Pour être praticable en physiologie, la méthode du calorimètre à glace devrait être modifiée par l'interposition entre l'enceinte à glace et l'enceinte où est placé l'animal d'une enceinte mauvaise conductrice dont l'épaisseur pourrait être déterminée de façon que la chambre intérieure puisse être maintenue par l'animal à un degré déterminé.

(1) On a proposé, pour éviter cette cause d'erreur, de combler les interstices de la glace par de l'eau à 0° et d'évaluer le poids de glace fondue par la contraction subie pendant l'expérience (HERSCHELL, BUNSEN).

Calorimètre thermo-électrique de d'Arsonval (1). — Le corps calorimétrique est une *soudure thermo-électrique* creuse enveloppant l'animal et conjuguée avec une soudure semblable maintenue à température constante.

Sous l'influence de la chaleur dégagée par la source, la première soudure s'échauffe graduellement jusqu'à ce qu'elle ait atteint une valeur pour laquelle elle abandonne par rayonnement et par conductibilité au milieu ambiant une quantité de chaleur exactement égale à celle qu'elle reçoit de la source dans le même temps.

Lorsque l'équilibre est atteint, l'intensité du courant, mesurée au galvanomètre intercalé dans le circuit, est proportionnelle à la différence de température des deux soudures, laquelle varie avec le pouvoir calorifique de la source enfermée dans la première.

On a donc :

$$Q = k\,I.$$

La constante k se détermine, pour un appareil donné, en plaçant dans la soudure creuse des sources de chaleur de puissance calorifique connue et notant les intensités observées lorsque l'équilibre est atteint.

Dans cette méthode, l'équilibre est très rapidement atteint, l'échauffement de l'enceinte où est maintenu l'animal est très faible, et la variation thermique du corps calorimétrique peut être mesurée avec une extrême précision.

Son auteur l'a utilisée pour l'étude de la production de chaleur par les tissus isolés de l'organisme et par les animaux inférieurs. On peut donner à l'appareil des dimensions microscopiques sans diminuer en rien sa sensibilité.

B. — Appareils à corps calorimétrique liquide.

Nous les diviserons en :

a. Méthodes dans lesquelles l'animal ou l'homme est mis directement au contact du liquide : méthode des bains (Liebermeister, Lefèvre).

b. Méthodes dans lesquelles l'animal ou l'homme est séparé du liquide calorimétrique par une enceinte d'air : calorimètres de Dulong et de Despretz, de d'Arsonval, de Rosenthal, etc.

a. Calorimétrie par les bains (2).

Le sujet est plongé dans une baignoire dont on connaît le *poids en eau*. On note la température du bain et celle du sujet au début et à la fin de l'expérience et, de ces variations de température, on déduit la chaleur cédée pendant l'expérience, en se basant sur les principes suivants :

Méthode du bain froid. — Quand un corps susceptible de produire de

(1) D'Arsonval, *Journal de l'anatomie et de la physiologie*, 1886, p. 156.

(2) Liebermeister, *Jahresberichte* de Hoffmann et Schwalbe, 1871, p. 581. — Kernig, *Contribution à l'étude de la régulation de la chaleur*, thèse de Dorpat, 1864. — Hattwig, *Causes de l'élévation de température dans les fièvres*, thèse de Berlin, 1867.

la chaleur est placé dans un milieu qui lui en emprunte, *si sa température reste constante*, la quantité de chaleur perdue est égale à celle qu'il produit pendant le même temps. On a :

$$Q = \pi \, (T - t),$$

π représentant le poids en eau du système ; t et T, les températures initiale et finale.

Méthode du bain à la température du corps. — Lorsqu'un corps de poids P et de chaleur spécifique C, susceptible de produire de la chaleur, est placé pendant un certain temps dans un milieu qui ne peut ni l'échauffer ni le refroidir, *si la température s'élève de* T°, la quantité de chaleur produite pendant ce temps est

$$Q = P \times C \times T.$$

Défectuosités. — Cette méthode, calquée, comme on voit, sur la *méthode des mélanges*, est passible de graves objections (1).

Au point de vue physiologique :

Applicable aux animaux *aquatiques*, elle place les animaux aériens, et l'homme en particulier, dans un milieu *anormal* susceptible de modifier profondément et la thermogenèse et la répartition de la chaleur dans les diverses régions (périphériques et centrale) de l'organisme.

La température du corps varie aussi bien dans un bain à 18°, où il se refroidit, que dans un bain à la température du corps où il s'échauffe. Dans les deux cas, la mesure exacte de la température du corps par l'application du thermomètre dans une région donnée constitue presque une impossibilité. D'autre part, la tête du sujet reste hors du bain ; on ne tient donc compte ni de la perte de la chaleur par l'air expiré, ni de la chaleur rayonnée par la tête.

Au point de vue physique :

La grande masse d'eau nécessaire pour l'immersion du sujet dans un bain (200 à 300 litres) rend très difficile l'évaluation exacte de sa température aux différents moments de l'expérience, quelles que soient les précautions prises pour faire le mélange des diverses couches.

L'homogénéité de la température d'une grande masse d'eau n'étant pas assurée, on ne peut compter ni sur son échauffement ni sur son refroidissement réguliers.

Une faible erreur dans les lectures thermométriques entraîne une erreur considérable dans les résultats, à cause de la grande quantité d'eau et de sa forte chaleur spécifique.

Dans un travail récent ayant pour objet la *mesure des quantités de chaleur perdue par l'organisme dans les bains froids* (2), Lefèvre a réduit au minimum les causes d'erreur :

1° En employant une baignoire calorimétrique de forme spéciale ne néces-

(1) Winternitz, *Beiträge zur Lehre von Wärme regulation* (*Archiv für experim. Pathologie und Pharmakologie*, LVI, p. 181 et suiv.).

(2) *Société de biologie*, 1894, p. 450, et *Archives de physiologie*, 1896, p. 32.

sitant que 72 litres d'eau pour un homme accroupi, ou 100 litres pour un sujet plongeant entièrement dans l'eau ;

2° En assurant l'homogénéité de température à l'aide d'un agitateur convenablement disposé, et en faisant la correction du refroidissement ;

3° En augmentant la précision des lectures thermométriques à l'aide de thermomètres de grande sensibilité observés avec un viseur.

b. Méthodes dans lesquelles l'animal est séparé du liquide calorimétrique par une enceinte d'air.

D'après le procédé employé pour mesurer l'action de la source calorifique sur le liquide calorimétrique, on peut subdiviser les appareils de cette catégorie en :

α. Calorimètres à liquide et à échauffement (Dulong et Despretz, Desplats) ;

β. Calorimètres à liquide et à température constante (d'Arsonval).

α. Calorimètres a liquide et a échauffement.

Appareil de Dulong. — *Principe.* — L'enceinte d'air où se trouve l'animal est totalement immergée dans un calorimètre à eau ; la mesure de la chaleur dégagée se déduit de la détermination directe de l'échauffement subi par l'eau pendant l'expérience.

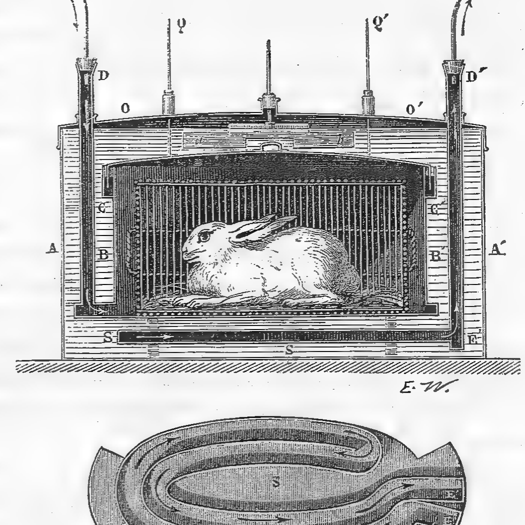


Fig. 516.

Le calorimètre de Dulong (1) comprend deux enceintes concentriques en métal (fig. 516), l'intérieure BB', destinée à recevoir l'animal, est une boîte en fer-blanc très mince munie d'un couvercle dont les rebords s'engagent dans deux rainures CC' contenant du mercure et qui permet une fermeture hermétique. Cette enceinte est munie de deux tubes métalliques DD' dont l'un s'ouvre directement dans la boîte, tandis que l'autre communique en E' avec un serpentin SS placé à la partie inférieure de l'enceinte et faisant corps avec elle. L'extrémité E de ce serpentin s'ouvre dans l'intérieur de la boîte.

(1) *Annales de chimie et de physique*, 3e série, t. I, p. 440.

L'enceinte extérieure AA′ est aussi en fer-blanc ; elle contient une quantité d'eau suffisante pour recouvrir complètement la boîte BB′.

Elle est munie d'un couvercle OO′ qui présente des ouvertures livrant passage à des thermomètres Q et Q′, et à des agitateurs *a* et *b*, destinés à mesurer la température de l'eau et à assurer son égale répartition dans toute la masse liquide.

L'animal, enfermé dans une cage très légère d'osier, est placé dans l'enceinte intérieure. Un courant d'air de vitesse convenable (1) y pénètre par le tube D, sert à la respiration, s'engage dans l'ouverture E du serpentin et en sort en E′ par le tube D′, après s'être mis en équilibre thermique avec l'eau du calorimètre.

Soit π le *poids en eau* du calorimètre et des diverses pièces qu'il contient, si t représente l'élévation de température éprouvée par le liquide pendant l'expérience, on a :

$$\text{Chaleur dégagée par l'animal} = \pi \times t.$$

Le calorimètre de Despretz (2) est calqué exactement sur celui de Dulong. La seule modification apportée par Despretz a consisté à *indiquer* de recueillir sur le mercure les gaz de la respiration, au lieu de les recueillir sur l'eau, comme cela se faisait dans les gazomètres de Dulong.

Appareil de Desplats. — Il permet, comme le précédent, de mesurer à la fois la chaleur dégagée, l'oxygène absorbé et l'acide carbonique exhalé par un animal dans un temps donné. Le principe de la méthode est le même et l'appareil comprend aussi :

1° Une boîte métallique dans laquelle on place l'animal en expérience ;

2° Un calorimètre à eau analogue à l'appareil de M. Berthelot représenté figure 509, page 807 ;

3° Un système destiné à renouveler l'air dans lequel l'animal respire et permettant de recueillir et d'analyser les gaz de la respiration.

L'adoption de l'enceinte calorimétrique de Berthelot, recouverte extérieurement d'une enveloppe protectrice de feutre très épais, met le calorimètre à l'abri des influences extérieures et permet de le maintenir dans des conditions constantes pendant la durée d'une expérience.

Desplats a mesuré avec cet appareil la chaleur dégagée par de petits animaux (rats, cobayes, oiseaux) (3).

Le même dispositif a été utilisé par Quinquaud pour la mesure de l'influence du froid et de la chaleur sur la quantité de chaleur émise par un animal (4).

Le calorimètre de Senator (5) présente les mêmes dispositions générales

(1) Ce courant d'air est obtenu simplement par le jeu moyen de deux gazomètres reliés l'un au tube D, l'autre au tube D′. Les gaz expirés recueillis dans le gazomètre D′ peuvent être analysés et fournir la mesure des combustions respiratoires de l'animal.

(2) *Annales de chimie et de physique*, 2e série, t. XXVI, p. 362.

(3) *Journal de l'anatomie et de la physiologie*, 1886, p. 213-223.

(4) *Journal de l'anatomie et de la physiologie*, 1887, et *Études de thérapeutique expérimentale et clinique*, 1892, p. 101-111.

(5) Senator, Neue Untersuch. über die Wärmebildung. (*Archiv für Anatomie und Physiologie*, 1872, p. 1 à 55, et 1874, p. 18 à 57).

que celui de Dulong. Il en est de même du calorimètre de Wood (1).

Au même type se rattache aussi le calorimètre de I. Ott (2). L'appareil représenté figure 517 a servi à l'auteur pour ses recherches de calorimétrie humaine. C'est un cylindre à double paroi dont l'enceinte intérieure, munie d'un couvercle K, reçoit le sujet en expérience et dont la cavité annulaire est remplie d'eau (250 kilogrammes). L'échauffement de cette eau mesuré par

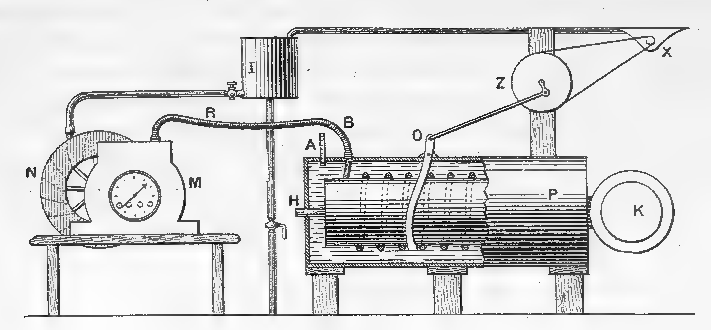


Fig. 517.

un thermomètre sensible A permet le calcul de la chaleur dégagée lorsqu'on connaît le *poids en eau* du système. L'air de ventilation pénètre en H, sert à la respiration, passe par un serpentin B, à travers le matelas d'eau auquel il cède toute sa chaleur, et finalement est aspiré par une turbine N à travers un compteur M. Un agitateur O, actionné mécaniquement (X-Z), rend uniforme la température de la masse d'eau. Enfin, le système est protégé contre le rayonnement par une épaisse couche de feutre isolant.

La méthode de Dulong a été encore récemment adoptée par M. A. Likhatscheff dans ses recherches calorimétriques sur l'homme sain et malade (3).

Critique de la méthode de Dulong. — On a reproché à cette méthode, au point de vue physiologique :

1° L'*élévation de la température du milieu dans lequel est enfermé l'animal,* élévation de température qui, comme on le sait très bien aujourd'hui, influence notablement la radiation calorifique ;

2° Le *refroidissement de l'animal* par un courant continu d'air assez rapide pour satisfaire aux besoins de sa respiration.

Au point de vue physique :

3° Le *manque de sensibilité*, résultant de la grande chaleur spécifique de l'eau ;

4° L'*incertitude des indications*, résultant du défaut d'homogénéité de la température dans la masse d'eau qui est toujours assez considérable dans les appareils adaptés aux recherches sur des animaux de grande taille ;

5° L'*erreur résultant du rayonnement* vers le milieu ambiant pendant la durée de l'expérience : aussi bien protégé qu'il soit, le calorimètre rayonne

(1) Wood, *Smithsonian Institution.* Philadelphie, 1880.
(2) I. Ott, *New York medical Journal,* 1889, p. 342-345.
(3) A. Likhatscheff, *C. R. du XIIIe Congrès international de médecine.* Paris, 1900.

d'autant plus qu'il s'échauffe davantage et perd ainsi une certaine quantité de la chaleur dégagée qui n'est pas accusée au thermomètre.

La première défectuosité, *élévation de la température de l'appareil*, est inhérente à la méthode elle-même.

Quant aux autres, on peut y remédier en adoptant certaines dispositions et précautions spéciales.

Refroidissement de l'animal. — Si l'on veut faire à l'intérieur du calorimètre une ventilation assez énergique pour que l'air de l'enceinte, constamment renouvelé, ne renferme à un moment quelconque que des traces d'acide carbonique, l'animal pourra évidemment se refroidir notablement dans une expérience assez longue ; mais cette ventilation énergique n'est pas nécessaire, comme cela ressort des résultats expérimentaux obtenus par Laulanié : dans ses recherches sur l'asphyxie en vase clos (1), il a montré que le chimisme respiratoire reste normal aussi longtemps que l'atmosphère respirée ne contient pas plus de 6 à 7 p. 100 d'acide carbonique et n'a pas perdu plus de 7 à 10 p. 100 d'oxygène.

Une ventilation énergique serait donc tout au moins inutile ; elle pourrait introduire une cause d'erreur en empêchant l'air échauffé par la respiration de céder, avant de sortir, toute sa chaleur au calorimètre.

Défaut de sensibilité. — L'insensibilité résultant de la grande chaleur spécifique de l'eau peut être compensée par l'augmentation de sensibilité de l'instrument de mesure (thermomètres à échelle fractionnée divisés en centièmes de degré, observés avec un viseur) (Lefèvre, Laulanié).

Incertitude dans l'évaluation des températures. — Les résultats expérimentaux obtenus par Lefèvre et par Laulanié démontrent aussi que cette cause d'erreur peut être annulée : avec un agitateur convenablement disposé, on peut réaliser en quelques instants, dans une grande masse d'eau, un mélange homogène isotherme en tous ses points.

Erreur due au rayonnement. — On peut la mesurer (correction du refroidissement) en plaçant le calorimètre dans une enceinte à température constante (Lefèvre), ou, dans les conditions ordinaires d'expérimentation, par l'observation d'un calorimètre *témoin* (Laulanié).

Méthode du calorimètre double de Laulanié (2). — Ce physiologiste a cherché à se mettre à l'abri de la cause d'erreur due au rayonnement du calorimètre placé dans un laboratoire ordinaire sujet à des variations de température assez marquées pendant la durée d'une expérience.

A cet effet, il a employé deux calorimètres, type Dulong, exactement semblables, renfermant la même quantité d'eau et ayant le même poids en eau. Ils sont destinés : l'un, le calorimètre proprement dit, à recevoir l'animal dont on cherche la puissance calorifique ; l'autre, à fonctionner à vide, dans les mêmes conditions physiques, *calorimètre témoin*.

L'expérience montre que les deux appareils, à vide, sont influencés de la même façon par la température extérieure, aussi bien lorsqu'ils sont nus que lorsqu'ils sont enveloppés d'un épais matelas de feutre isolant.

(1) *Archives de physiologie*, 1894, p. 845.
(2) *Archives de physiologie*, 1898.

Principe de la méthode. — Les deux appareils étant remplis d'eau à une température inférieure de 3 ou 4 degrés à la température ambiante, s'échaufferaient également s'ils fonctionnaient tous deux à vide. Mais il n'en est plus ainsi si l'on place dans l'un d'eux une source de chaleur : celui-ci s'échauffe, pendant l'expérience, d'une quantité E, tandis que le témoin ne s'échauffe que d'une quantité plus petite e qui représente évidemment la quantité de chaleur reçue par le calorimètre du milieu ambiant; c'est la valeur de son *échauffement spontané.*

$(E - e)$ est donc l'échauffement dû à la source qu'il s'agit de mesurer. Par conséquent, en désignant par π le poids en eau du calorimètre, on a :

$$\text{Chaleur dégagée par la source} = \pi(E - e).$$

Correction du rayonnement. — L'expression $\pi(E - e)$ donnerait exactement la chaleur dégagée par la source, sans correction aucune, si l'échauffement spontané du calorimètre était le même que celui du témoin. En réalité, il n'en est pas ainsi : la quantité de chaleur reçue de l'atmosphère ambiante par l'un et par l'autre appareil est, à chaque instant, proportionnelle à l'excès de la température extérieure sur la température propre de chaque calorimètre. Or celui qui contient l'animal s'échauffant beaucoup plus que l'autre, l'excès de la température extérieure sur sa température propre est moindre à chaque instant que pour le témoin et e est supérieur à l'échauffement vrai qu'il a subi du fait du milieu ambiant.

En pratique, on constate expérimentalement que l'erreur commise en employant sans correction l'expression $\pi(E - e)$ est négligeable toutes les fois que la durée de l'expérience ne dépasse pas trois heures, et que l'échauffement du calorimètre reste inférieur à 1 degré.

Au delà de ces limites, une correction est nécessaire. On peut la faire d'une façon très simple en appliquant la loi de NEWTON (1).

(1) *Les vitesses d'échauffement du calorimètre et du témoin sont proportionnelles aux excès moyens de la température extérieure.*

Soient :

A et A′, les valeurs de cet excès au début;
E et e, les valeurs de l'échauffement des deux appareils après un temps t.

Si les deux systèmes marchaient à vide, on aurait, pour les échauffements respectifs, au bout du temps t :

$$\frac{x}{e} = \frac{A}{A'}$$

L'échauffement ayant été : E pour le calorimètre, e pour le témoin, les excès moyens sont :

$$A - \frac{E}{2} \qquad \text{et} \qquad A' - \frac{e}{2}$$

et les *échauffements spontanés* ont été, pendant l'expérience, x et e, tels que l'on ait

$$\frac{x}{e} = \frac{A - \frac{E}{2}}{A' - \frac{e}{2}} = \frac{2A - E}{2A' - e}$$

d'où l'on tire

$$x = e \times \frac{2A - E}{2A' - e}$$

β. Calorimètres a liquide et a température constante.

On a utilisé, pour maintenir constante la température du liquide calorimétrique que la source tend à échauffer, deux procédés différents :

1° La chaleur dégagée est employée à vaporiser le liquide (choisi à point d'ébullition peu élevé) : *calorimètre par distillation ou vaporisation*;

2° On ramène constamment le calorimètre à la température initiale par une source frigorifique : *calorimètre par compensation.*

$\frac{2A-E}{2A'-e}$ est le *coefficient de correction* par lequel il faut multiplier l'échauffement spontané du *témoin* pour avoir exactement l'échauffement spontané du calorimètre.

Contrôle physique du calorimètre double. — Les chiffres suivants, empruntés au mémoire de Laulanié, montrent la nécessité et l'efficacité de cette correction :

Une masse d'eau chaude dont le *poids en eau* est $7^{kg},556$ est introduite dans le calorimètre; elle lui abandonne une quantité de chaleur qu'il s'agit de mesurer :

Source.	Chiffres observés.
Température initiale de la masse à $8^h,56$	$70^o,35$
— finale à $5^h,3$	$46^o,30$
Refroidissement en $8^h,7'$	$24^o,05$
— en 8^h	$23^o,602$

D'où :

$$\text{Chaleur cédée au calorimètre} = 7,556 \times 23,602 = 179^{cal},068.$$

Calorimètre (poids en eau : $\pi = 73^{kg},6$).

		9 h. du matin.	5 h. du soir.
Température	du calorimètre	$15^o,275$	$17^o,95$
	du témoin	$15^o,180$	$15^o,61$
	de l'air ambiant	$17^o,8$	$18^o,8$

D'où :

Échauffement en 8 h.	du calorimètre	$2^o,675$
	du témoin	$0^o,43$
	Différence $(E-e)$ =	$2^o,245$

On a donc, *sans correction* :

$$\text{Chaleur trouvée au calorimètre : } \pi(E-e) = 73,6 \times 2,245 = 165^{cal},232.$$

Comme on le voit, la différence entre le chiffre vrai et le chiffre trouvé est considérable. Appliquons la formule de correction :

$$x = e\,\frac{2A-E}{2A'-e}.$$

$$\text{Température extérieure moyenne} = \frac{17^o,8 + 18^o,8}{2} = 18^o,3.$$

$$A = 18^o,3 - 15^o,275 = 3^o,025 \qquad E = 2^o,675$$
$$A' = 18^o,3 - 15^o,180 = 3^o,120 \qquad e = 0^o,43$$

d'où :

$$\frac{2A-E}{2A'-e} = \frac{3^o,375}{5^o,810} = 0,580,$$

et enfin :

$$x = 0^o,43 \times 0,580 = 0^o,249.$$

Ce qui donne pour la chaleur cédée par la source :

$$Q = (E-x)\pi = 73,6 \times (2^o,675 - 0^o,249) = 178^{cal},553 ;$$

chiffre très voisin, comme on voit, de la chaleur vraie perdue par la source durant l'expérience.

1. ***Méthode calorimétrique par distillation.*** — Cette méthode, susceptible d'une grande précision, a été employée par ROSENTHAL (1) en calorimétrie animale, et par M. D'ARSONVAL (2), qui s'en est servi aussi pour la détermination de l'équivalent mécanique de la chaleur.

Elle utilise la *chaleur* (latente) *de volatilisation des liquides en présence de leur vapeur saturée.*

En voici le principe représenté schématiquement dans la figure 518 empruntée à D'ARSONVAL : En A est le calorimètre dont l'espace annulaire est rempli d'un liquide volatil (aldéhyde, éther sulfurique, etc.) ; il communique avec le récipient B, gradué. Le tout constitue un *espace clos*, dont on a chassé l'air par ébullition avant la fermeture définitive. Le calorimètre A est placé dans un récipient C contenant de l'air, et plongé dans le vase D contenant de l'eau, dans laquelle est aussi immergé le tube B.

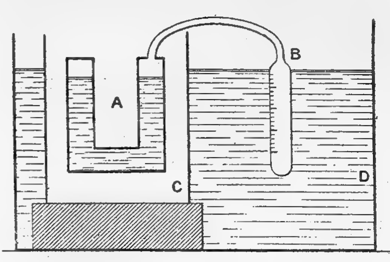


Fig. 518.

Le système étant ainsi disposé, et A et B étant à une même température, *aucune distillation n'aura lieu de* A *vers* B, *quelles que soient les variations de la température extérieure.*

Mais si l'on place dans l'intérieur du calorimètre une source calorifique, la chaleur dégagée sera employée intégralement à vaporiser le liquide et à le faire distiller vers le tube, *sans changement de température*, absorbée qu'elle est par la production du *changement d'état.*

La lecture du volume de liquide distillé donne le poids p de liquide vaporisé pendant l'expérience. Si L représente la *chaleur de volatilisation*, on a :

$$\text{Chaleur dégagée par la source : } Q = p \times L.$$

2. ***Méthode calorimétrique par compensation.*** — Imaginée par D'ARSONVAL et adaptée par lui aux recherches de calorimétrie animale, elle constitue la vraie méthode de choix, car elle répond aux diverses et multiples conditions d'ordre physique et physiologique que nous avons énumérées au début de cette étude.

PRINCIPE GÉNÉRAL DE LA MÉTHODE. — Le calorimètre est constitué par deux cylindres métalliques concentriques limitant deux cavités : l'une, centrale, reçoit l'animal en expérience ; l'autre, annulaire, est remplie de liquide (eau, pétrole, etc.). Ce liquide est traversé par un serpentin dont une extrémité est reliée à la *source frigorifique* (eau à zéro), l'autre extrémité communiquant par un tube de caoutchouc avec un récipient destiné à recevoir l'eau écoulée. Ce tube passe à travers un *régulateur d'écoulement* actionné par le liquide du calorimètre, et tel que l'écoulement d'eau froide à travers le serpentin

(1) ROSENTHAL, *Archiv für Physiologie*, 1878, p. 349 et suiv.
(2) D'ARSONVAL, *Comptes rendus de la Société de physique*, 1880, et *Mémoires de la Société de biologie*, 1881.

commence aussitôt que la température du calorimètre s'élève au-dessus de la température ambiante.

Tout le temps que la température du calorimètre reste constante, l'écoulement d'eau froide est nul ; aussitôt, au contraire, que l'animal est introduit dans l'appareil, l'écoulement commence, d'autant plus rapide que la source de chaleur est plus intense.

Soit t la température constante du calorimètre et de l'enceinte dans laquelle il est placé; si P est le poids d'eau à zéro qui a traversé l'appareil pendant l'expérience, on a :

$$\text{Chaleur dégagée par la source : } Q = P \times t.$$

Une condition absolue de l'exactitude de la méthode est le maintien à un degré invariable de la température ambiante.

On la réalise : soit en plaçant le calorimètre dans une *enceinte à température constante* dont M. d'Arsonval a imaginé plusieurs modèles ; soit, lorsque la chose est possible, en opérant dans un laboratoire dont la température n'est soumise qu'à des variations très faibles qu'on pourra rendre insignifiantes en environnant le calorimètre d'un vaste récipient à double paroi dont la cavité annulaire est remplie d'eau.

Description de l'appareil. — L'examen de la figure 519 dispense de longs

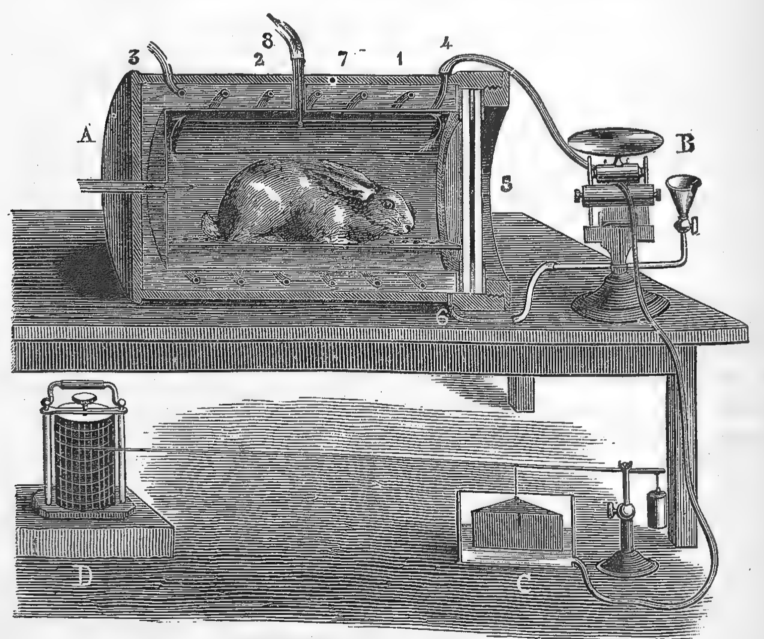


Fig. 519.

détails. On y voit l'animal en place, isolé de la paroi métallique par une planchette en bois. L'air servant à sa respiration arrive par le tube A et sort en 8, après s'être laminé le long du trajet indiqué par les flèches contre le

calorimètre et lui avoir cédé toute sa chaleur, grâce à la lame métallique, formant plafond, que l'on voit à la partie supérieure de l'enceinte où l'animal respire. Le récipient d'eau à zéro (vase de Mariotte) est relié en 3 au serpentin réfrigérant dont l'autre extrémité (4) est en relation par un tube en caoutchouc avec le *régulateur d'écoulement* B.

Ce régulateur est actionné *automatiquement* par le liquide de l'espace annulaire avec lequel il est relié par le tube 6 : à l'aide de poids placés sur le plateau et juste suffisants pour obturer la lumière du caoutchouc par compression entre les deux cylindres entre lesquels il est disposé, l'écoulement est nul tant que le calorimètre est vide. Aussitôt que la source de chaleur est introduite, le liquide calorimétrique se dilate, soulève le cylindre supérieur et permet l'écoulement de l'eau compensatrice à travers le caoutchouc décomprimé.

Le dispositif C, D sert à mesurer le volume de liquide écoulé et à l'inscrire : C est un vase cylindrique muni d'un flotteur ne touchant pas la paroi, suspendu à un long levier et équilibré par un contrepoids. L'extrémité du levier est munie d'un style qui inscrit les phases de l'écoulement, et par conséquent du dégagement de chaleur, sur un cylindre enregistreur animé d'un mouvement uniforme.

On peut contrôler l'exactitude de l'appareil en plaçant à l'intérieur du calorimètre une source d'intensité connue. Les résultats expérimentaux obtenus par divers expérimentateurs montrent que l'écart est très faible entre la chaleur cédée par la source et le chiffre trouvé par la mesure de l'eau écoulée pendant l'expérience.

Dans ses recherches de calorimétrie animale, SIGALAS a mesuré *simultanément* la *radiation calorifique* et les *combustions respiratoires* à l'aide d'un dispositif comprenant : 1° un calorimètre du type de D'ARSONVAL ; 2° un appareil à respiration du genre de celui de REGNAULT et REISET, agencés de façon à permettre l'inscription simultanée des calories dégagées et de l'oxygène absorbé par l'animal en expérience (1).

D'ailleurs, la méthode de d'Arsonval a été récemment adoptée par divers physiciens, en particulier par M. MICULESCU, pour la mesure de l'équivalent mécanique de la chaleur (2).

Il est à peine besoin d'ajouter qu'elle se prête aussi, avec de légères modifications de détail, à la mesure des absorptions de chaleur ; on a recours, dans ce cas, à des sources de *chaleur* compensatrices.

C. — Appareils à corps calorimétrique gazeux (généralement « l'air »).

Principe. — Une source, siège d'un dégagement continu de chaleur, est placée à l'intérieur d'une enceinte close remplie d'air et placée elle-même dans une chambre à température constante *t*. Cet air s'échauffe graduellement sous l'action de la source calorifique.

(1) SIGALAS, Thèse de doctorat en médecine. Bordeaux, 1890.
(2) MICULESCU, Thèse de doctorat ès sciences physiques. Paris, 1891.

D'autre part, l'enceinte, devenue plus chaude, perd de la chaleur et d'autant plus, en vertu de la *loi de* NEWTON, que sa température s'élève davantage. On a, en effet, à chaque température t' de l'enceinte :

$$\text{Chaleur perdue dans l'unité de temps} = e(t' - t) \ (1),$$

e étant la constante d'émission dépendant de la nature et de la grandeur de la surface de l'enceinte.

A un moment donné, la température t' cesse de croître, reste *stationnaire* : c'est qu'à ce moment la différence de température $t_l - t$ est telle que la chaleur perdue par l'enceinte dans l'unité de temps est égale à celle qu'elle reçoit de la source intérieure. On peut donc écrire :

$$\text{Chaleur dégagée par la source dans l'unité de temps} = e(t_l - t).$$

Remplaçant la source calorifique par une source d'intensité connue dégageant n calories dans l'unité de temps, et telle qu'elle produise dans l'appareil la même différence de température $t_l - t$, on aura évidemment :

$$\text{Chaleur dégagée par la source dans l'unité de temps} = n \text{ calories.}$$

En pratique, on détermine une fois pour toutes la valeur de la constante e (étalonnage de l'appareil).

Les calorimètres à air peuvent être divisés en deux catégories :

1° Ceux dans lesquels l'air qui sert de corps calorimétrique est au contact immédiat de l'animal, source de chaleur ;

2° Ceux dans lesquels l'air calorimétrique, sans contact avec l'animal, est enfermé dans la cavité annulaire d'un récipient à double paroi dont la cavité intérieure reçoit l'animal en expérience.

I. — L'air calorimétrique est au contact immédiat de l'animal, source de chaleur.

Calorimètre de Hirn. — Voici, d'après l'auteur, la description de l'appareil qu'il a utilisé pour la *mesure de la chaleur produite par l'homme à l'état de repos et à l'état de travail* (2) :

Le calorimètre consistait en une guérite en bois aussi hermétique que possible, munie de fenêtres et placée au milieu d'une salle dont la température ne variait que très lentement. Des thermomètres très bien sous-divisés indiquaient, d'une part, la température de la salle et, d'autre part, la température interne du calorimètre où un agitateur mû mécaniquement mêlait sans cesse les couches d'air.

TITRAGE. — On faisait brûler dans l'appareil un bec alimenté d'hydrogene pur, dépensant une quantité de gaz tenue bien constante pendant l'opération, mais variée d'une expérience à l'autre. On laissait brûler ce bec à régime

(1) Pour les différences de température dans les limites desquelles la loi de Newton est applicable : $t' - t < 30°$.

(2) *Revue scientifique*, 1887, t. XVIII, p. 681.

constant, jusqu'à ce que la température de l'air interne ne variât plus. On savait ainsi combien de gaz il fallait brûler par heure et par conséquent combien de chaleur il fallait produire dans la guérite, pour en maintenir la température à 5°, 10°, 15°, etc., au-dessus de la température externe. On connaissait par là, en un mot, la loi de refroidissement de la guérite.

Détails d'une expérience. — Le sujet étant placé dans la guérite, on introduisait par une lucarne, placée dans le bas, un morceau de fer rouge destiné à porter rapidement l'air interne à la température stable finale. Pendant tout ce temps, l'air de sa respiration était envoyé à l'extérieur, à l'aide d'un tube de caoutchouc de forte section placé dans sa bouche et communiquant avec un gazomètre permettant la mesure du volume d'air respiré en un temps donné. Lorsque la température de l'enceinte était à peu près stationnaire, toutes les ouvertures étaient fermées, le sujet déposait le tube de caoutchouc et respirait librement dans la chambrette jusqu'à ce que la température fût devenue parfaitement stable. Par la différence de température externe et intérieure, on avait la chaleur dégagée. L'analyse de l'air de la guérite permettait, d'autre part, la détermination de l'oxygène absorbé et de l'acide carbonique exhalé.

Hirn a indiqué lui-même (1) comme perfectionnements à apporter aux expériences futures : « *un calorimètre à parois de tôle de fer ou de zinc, porté sur des poutrelles au lieu de poser à terre; l'emploi d'une loi de refroidissement étudiée directement; un thermomètre différentiel à air donnant à un vingtième de degré près la différence entre l'intérieur de la chambrette et l'extérieur...* »

Nous allons trouver ces modifications dans l'appareil de M. Kaufmann.

Calorimètre de Kaufmann (2). — La guérite en bois de Hirn est remplacée par une petite chambre de forme cubique, d'une capacité de 2 600 litres, à parois métalliques, en mince tôle de zinc, supportée par quatre pieds. Une porte métallique, munie d'une vitre pour permettre l'éclairage, sert à fermer l'enceinte d'une façon hermétique.

Le calorimètre est installé dans une vaste salle à température sensiblement invariable. L'animal est placé au centre de l'appareil, de façon à n'être à aucun moment en contact avec les parois, et il respire l'atmosphère de l'enceinte qui, d'après les chiffres de M. Laulanié, est assez vaste pour que, pendant la durée d'une expérience, les altérations de l'air par la respiration ne puissent jamais atteindre un degré capable d'entraîner une modification du chimisme respiratoire ou de l'émission de chaleur.

L'homogénéité de l'air de l'enceinte est obtenue soit à l'aide d'un gros soufflet dont les orifices d'aspiration et d'expulsion sont reliés respectivement avec la partie inférieure et avec la partie supérieure de la chambre, soit, plus commodément, à l'aide d'un ventilateur à ailettes mû par l'électricité.

La température de l'air du calorimètre et celle du laboratoire sont données par deux thermomètres enregistreurs permettant d'apprécier le vingtième de degré.

(1) *Loc. cit.*, p. 779.
(2) Kaufmann, *Archives de physiologie*, 1896, p. 329 et suiv.

La figure 520, empruntée au mémoire de M. Kaufmann, montre les courbes obtenues en expérimentant sur un chien dans les conditions ci-dessus

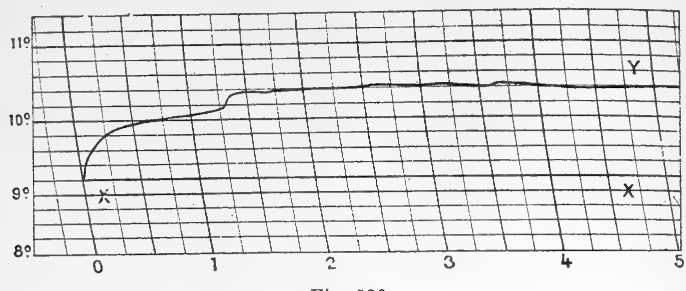


Fig. 520.

résumées. XX est la courbe du thermomètre extérieur. YY, celle du thermomètre intérieur.

Titrage du calorimètre. — Afin de pouvoir déduire de l'examen de ces courbes la puissance calorifique de l'animal en expérience, l'appareil a été étalonné, en mettant à la place de l'animal une source de chaleur parfaitement constante et connue (courant constant d'hydrogène, veilleuse alimentée par de l'huile de chaleur de combustion connue, circuit parcouru par un courant électrique...).

Pour éviter les causes d'erreur pouvant résulter de l'emploi d'une source artificielle, dont l'effet sur le calorimètre dépend dans une certaine mesure de ses dimensions et de sa forme géométrique, M. Kaufmann communique la chaleur de cette source à des plaques en tôle de surface se rapprochant de celle de l'animal et placées dans les mêmes conditions que lui par rapport aux parois de l'enceinte.

Anémo-calorimètre de d'Arsonval (1). — Cet appareil, imaginé pour servir surtout à la calorimétrie clinique, remplit les conditions requises pour ce genre de recherches :

1° Il peut s'installer dans n'importe quelle salle d'hôpital ;
2° Il est assez léger pour qu'on puisse le déplacer ;
3° Il permet une mesure rapide de la chaleur dégagée.

Principe. — Soit une chambre close analogue à la guérite de Hirn, à l'intérieur de laquelle est placée une source constante de chaleur. Sa température s'élève jusqu'à ce qu'elle ait atteint une valeur t_1 pour laquelle elle perd par rayonnement dans l'air ambiant, de température t, une quantité de chaleur Q égale à celle qu'elle reçoit de la source dans le même temps.

Lorsque l'équilibre est atteint, on a :

$$Q = E\,(t_1 - t).$$

Si on suppose la chambre, non plus hermétiquement close, mais munie de deux ouvertures, une inférieure par laquelle l'air pourra pénétrer libre-

(1) D'Arsonval, *Société de biologie*, 27 janvier 1894.

ment, l'autre supérieure par laquelle il pourra s'échapper, *la présence de la source intérieure déterminera un courant d'air (tirage) d'autant plus rapide*, toutes choses d'ailleurs égales, *qu'elle sera plus intense.*

Si le tuyau de sortie est muni d'un anémomètre, le nombre N *de tours du moulinet par unité de temps sera, comme l'était dans le cas de la chambre close la différence des températures intérieure et extérieure, fonction de la quantité de chaleur* Q *dégagée pendant l'unité de temps par la source.* On pourra écrire :

$$N = f(Q).$$

Un étalonnage préalable permettra de déduire Q de la valeur de N dans chaque expérience.

Description de l'appareil.— Un cylindre d'étoffe (laine, soie...) de 2 mètres de hauteur environ, attaché à un disque en bois de 80 centimètres de diamètre et maintenu dans sa forme à l'aide de deux cerceaux en bois, constitue la chambre calorimétrique qui est supportée au-dessus du sol par trois tiges en bois (fig. 521). Le plafond du cylindre porte une cheminée conique coudée à angle droit à sa partie supérieure et de diamètre tel que l'*anémomètre* s'adapte exactement à son extrémité (1).

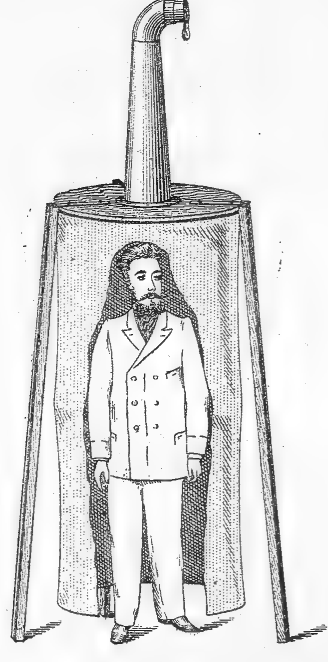


Fig. 521.

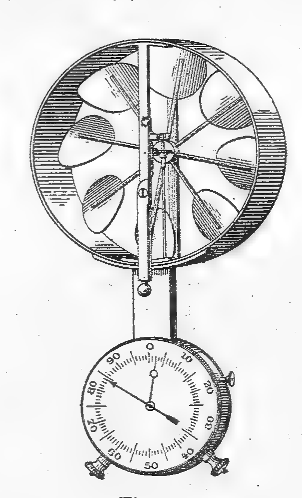


Fig. 522.

Ce dernier, construit par Richard, est constitué par un moulinet très léger, portant huit ailettes en aluminium inclinées à 45° sur l'axe de rotation, et dont le mouvement peut être transmis à un compteur de tours, à l'aide d'un

(1) Pour des recherches de calorimétrie clinique, on peut transformer en calorimètre nn lit d'hôpital, en recouvrant le dessus d'un plancher en bois portant la cheminée et son anémomètre et clouant tout autour une étoffe disposée de façon à laisser arriver l'air par le pied du lit (d'Arsonval).

embrayage effectué au moyen d'un levier. Une aiguille indique, en mètres, le chemin parcouru par l'air à la sortie du calorimètre ; une autre aiguille mesure le nombre de tours effectués par la première pendant l'expérience. Cet appareil présente une très haute sensibilité (fig. 522).

Étalonnage de l'anémo-calorimètre. — On place à l'intérieur de l'appareil une source de chaleur constante et connue dont on peut faire varier l'intensité, et on note, pour chaque valeur donnée à l'intensité de la source, le nombre de tours effectués par le moulinet dans un temps donné (cinq minutes par exemple), lorsqu'il a atteint sa vitesse maxima. Portant en ordonnées les calories par unité de temps et en abscisses les nombres de tours correspondants, on obtient une courbe analogue à celle de la figure 523, qui relie les quantités de chaleur aux indications anémométriques (1).

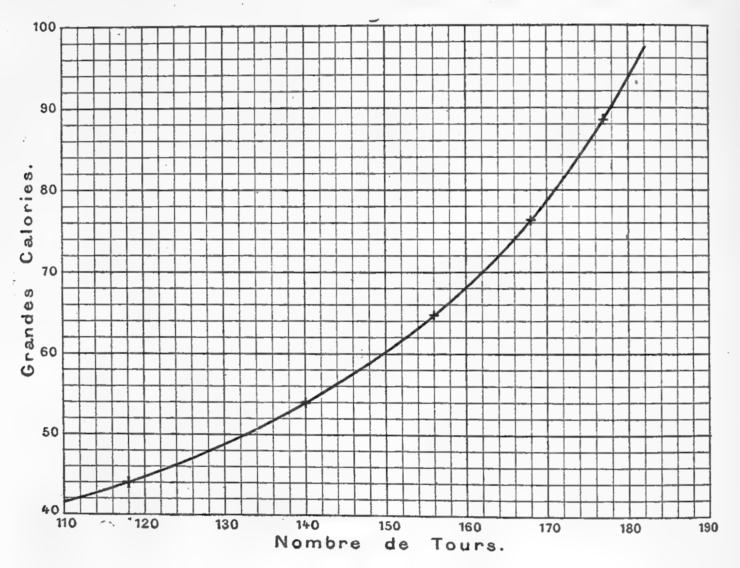


Fig. 523.

Il est bon, lorsqu'on emploie comme source artificielle un circuit métallique traversé par un courant électrique d'énergie connue (EI) :

1° De donner à ce rhéostat des dimensions telles que sa surface puisse être considérée comme sensiblement égale à la surface d'émission d'un sujet adulte et de le disposer dans le calorimètre à peu près à la hauteur que doit occuper la cage thoracique des sujets d'expérience ;

2° De faire le choix d'intensités de courant telles que la température du fil, lors des expériences de graduation, oscille aux environs de 37°. On se rapproche ainsi le plus possible des conditions présentées par les sujets qu'on substituera dans la suite à la source artificielle de chaleur.

D'après M. d'Arsonval, on trouve, pour certaines dimensions de l'appareil,

(1) Bergonié et Sigalas, *Société de biologie* et *Mémoires de la Société des sciences physiques et naturelles de Bordeaux*, 1895.

que *la chaleur dégagée par la source est proportionnelle au carré du nombre de tours effectués par l'anémomètre dans l'unité de temps.*

Marche d'une expérience. — Le sujet est introduit dans le calorimètre. Lorsque le *régime permanent* du moulinet est établi (dix minutes suffisent généralement), on embraye le compteur en même temps qu'on libère l'aiguille d'un chronomètre à secondes. Au bout de cinq minutes, exactement, on déclenche le compteur. On a, par simple lecture, le nombre de tours effectués par le moulinet. L'examen de la courbe de graduation donne immédiatement les calories dégagées.

Ajoutons que l'anémo-calorimètre a pu être très simplement transformé par M. d'Arsonval en *calorigraphe* : un courant électrique arrive aux bornes de l'anémomètre et actionne un électro-aimant qui fait monter d'un cran une plume imprégnée d'encre appuyant sur un cylindre enregistreur, toutes les fois que l'aiguille du compteur passe au zéro. On obtient ainsi une courbe qui totalise les indications de l'anémomètre et qui enregistre les phases du dégagement de chaleur pendant l'expérience (1).

II. — L'air calorimétrique est séparé de l'enceinte dans laquelle est placé l'animal.

Un schéma général de ces appareils est représenté par la figure 524.

L'air de la double enceinte s'échauffe sous l'action de la chaleur dégagée par l'animal placé dans la chambre intérieure jusqu'à ce qu'il ait atteint une température t_1 pour laquelle la chaleur perdue par la paroi dans l'air ambiant égale la chaleur reçue de la source dans le même temps. Ici encore, on peut écrire :

$$Q = e(t_1 - t).$$

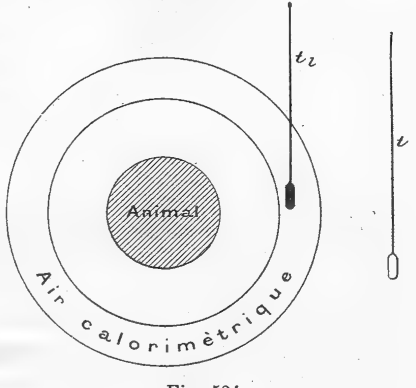


Fig. 524.

Les nombreux appareils de cette catégorie ne diffèrent, en somme, que par la méthode adoptée pour la mesure exacte de la température limite t_1 de l'air qui sert de corps calorimétrique.

A la mesure directe par le thermomètre, qui peut être incertaine, on substitue :

a. Soit la mesure de l'*augmentation de pression*, le volume de l'air étant maintenu constant.

On a :

$$p_1 = p_0(1 + \alpha t_1)$$
$$p_t = p_0(1 + \alpha t)$$

d'où :

$$p_1 - p_t = p_0 \alpha (t_1 - t).$$

(1) C'est le principe de l'*odographe* de Marey : *Méthode graphique*, p. 183.

Les augmentations de pression, à volume constant, sont rigoureusement proportionnelles aux élévations de températures.

b. Soit la mesure de l'*augmentation de volume*, la pression de l'air étant maintenue constante.

On a :

$$v_1 = v_0 (1 + \alpha t_1)$$
$$v_t = v_0 (1 + \alpha t)$$

d'où :

$$v_1 - v_t = v_0 \alpha (t_1 - t).$$

Les augmentations de volume, à pression constante, sont rigoureusement proportionnelles aux élévations de température.

Calorimètre à air de d'Arsonval. — Le modèle servant aux expériences sur l'homme est représenté figure 525. Il se compose de deux réci-

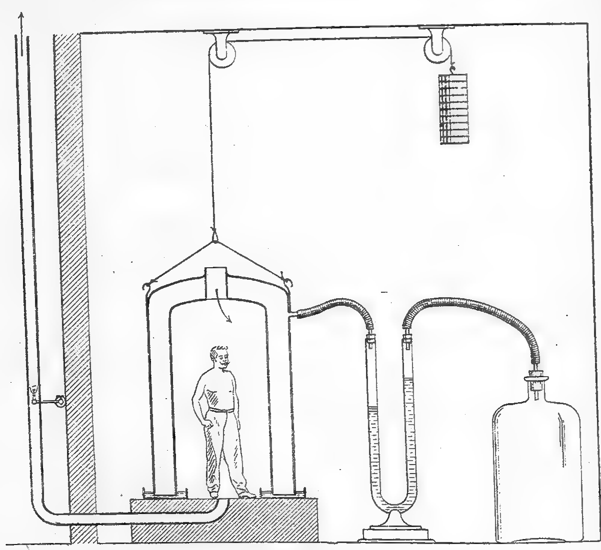


Fig. 525.

pients métalliques de forme cylindro-sphérique limitant deux cavités : une intérieure où se place le sujet, et dont la ventilation est assurée par un courant d'air dont le sens est indiqué par les flèches ; la seconde cavité, annulaire, est hermétiquement close et renferme l'air qui sert de corps calorimétrique. Cet air communique avec un tube en U contenant de l'eau, qui sert de manomètre. Le tout est suspendu au plafond par une poulie et équilibré par un contrepoids, qui permet de soulever facilement l'appareil. Sa base repose sur un socle muni d'une rainure remplie de liquide, grâce auquel on réalise une fermeture hydraulique du système.

La dénivellation du manomètre, *lorsque le liquide est stationnaire*, est proportionnelle à la différence des températures $(t_1 - t)$ et lui sert de mesure (1).

(1) On peut augmenter la sensibilité de l'appareil en se servant d'un manomètre de Kretz.

Si on a étalonné préalablement l'appareil à l'aide d'une source de chaleur d'intensité constante et connue, la simple lecture du manomètre servira à la mesure exacte de la chaleur dégagée par le sujet en expérience.

Pour éviter les causes d'erreur possibles résultant de variations de la pression atmosphérique et de la température ambiante survenues dans le cours d'une expérience, M. d'Arsonval relie la seconde branche du manomètre soit à un second calorimètre identique au premier (fig. 526), soit à un

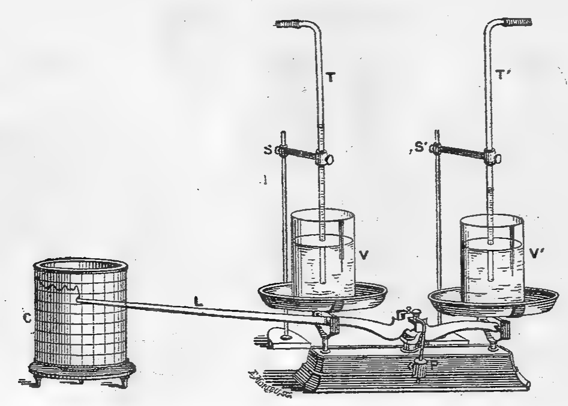


Fig. 526.

récipient d'assez grand volume, placé dans la même pièce, comme dans la figure 525.

Dans ces conditions, il est évident que l'on a un véritable *thermomètre différentiel*, et que *le manomètre indique constamment l'excès de la température intérieure sur celle du milieu ambiant*, c'est-à-dire précisément le facteur $(t_1 - t)$ qu'il s'agit de mesurer.

Inscription des calories dégagées. — On peut avoir recours aux deux dispositifs suivants (D'ARSONVAL) :

a. Le calorimètre et le réservoir *compensateur* sont reliés respectivement à deux tubes manométriques du même calibre TT', plongeant dans des vases VV' portés sur les plateaux d'une Roberval. Grâce aux supports SS', les tubes sont indépendants de la balance. Le fléau porte un levier L muni d'une plume qui inscrit son déplacement sur un cylindre enregistreur C. On voit que si, avant l'expérience, on a inspiré le liquide jusque vers le milieu des tubes, la balance inscrira la *différence de hauteur* dans les deux colonnes manométriques.

b. Le calorimètre et le compensateur, d'ailleurs *identiques*, sont respectivement reliés à deux cloches métalliques légères suspendues aux deux extrémités d'un fléau de balance en équilibre (fig. 527). Chaque cloche plonge dans un réservoir plein d'eau portant un tube central faisant communiquer l'air des deux cloches avec l'air du calorimètre et du compensateur. Ici aussi le fléau est muni d'un style inscripteur. Dans ces conditions, si les deux systèmes sont échauffés également, les deux cloches ne cessent pas de se faire équilibre et le fléau ne bouge pas. Si le calorimètre est échauffé par une source de chaleur, l'air se dilate et soulève la cloche correspondante à

une hauteur qui sert de mesure à l'échauffement et, par conséquent, à l'intensité de la source.

La disposition réalisée dans la figure 527 a l'avantage de faire un calorimètre différentiel, se prêtant très bien à des expériences comparatives sur des animaux.

A ce type d'appareils se rattachent, par leurs dispositions générales et par

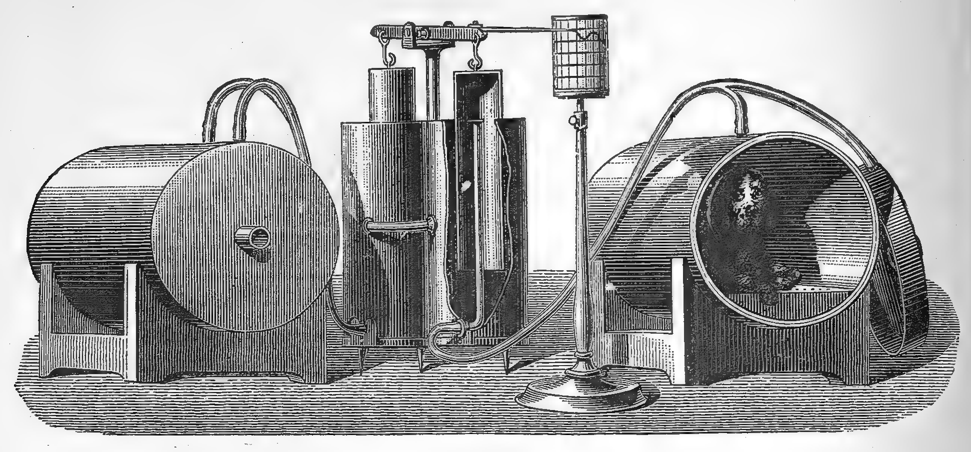


Fig. 527.

les procédés de mesure de l'échauffement de l'air, les calorimètres de ROSENTHAL (1) et de RÜBNER (2).

Nous signalerons seulement, comme dispositions spéciales : 1° l'augmentation de la surface rayonnante du cylindre intérieur par de larges lames métalliques, sans contact avec le cylindre extérieur ; 2° le passage de l'air de ventilation dans un tube métallique traversant l'espace annulaire; 3° le mode de compensation obtenu par une série de tubes métalliques communiquant entre eux et placés tout autour du calorimètre.

De plus, pour rendre son appareil indépendant des variations de la température ambiante et rendre possibles des expériences de longue durée, RÜBNER, adoptant le dispositif indiqué dans la figure 509 représentant le calorimètre de M. BERTHELOT, enferme tout son appareil dans une enceinte isolée de l'air extérieur par un matelas d'eau contenu dans un vaste récipient à double paroi et entouré de feutre mauvais conducteur (*Isolirraum*).

Calorimètre à siphon de Richet (3). — La détermination de la chaleur dégagée est effectuée dans cet appareil par la mesure de la dilatation de l'air, sous pression constante.

L'enceinte à double paroi est constituée par un serpentin tubulaire en cuivre, disposé en forme de double hémisphère, articulé par une charnière (fig. 528).

(1) ROSENTHAL, Calorimetrische Untersuchungen (*Archiv für Physiologie*, 1889, p. 1-53), et Physiologische Calorimetrie (*Berliner klinische Wochenschrift*, 1893, p. 911-915).

(2) RUBNER, Ein Calorimeter für physiologische und hygienische Zwecke (*Zeitschrift für Biologie*, 1889, p. 400 et suiv., et *Archiv für Hyg.*, 1890, t. X, p. 289).

(3) RICHET, *Archives de physiologie*, 1885, p. 460 et suiv.

Pour mesurer la dilatation de l'air, l'intérieur du serpentin est relié par un tube de caoutchouc à la partie supérieure d'un flacon hermétiquement clos et rempli de liquide avec un siphon amorcé. On comprend, à l'examen de la figure, que la moindre augmentation de pression produite par l'air du tube fera écouler l'eau du siphon, et que *le volume de l'eau écoulée mesurera exactement la dilatation de cet air.*

Pour que la pression reste constante, il suffit de ramener constamment l orifice d'écoulement au niveau exact de l'eau dans le vase clos.

Cette égalité de niveau étant établie au début d'une expérience, on place

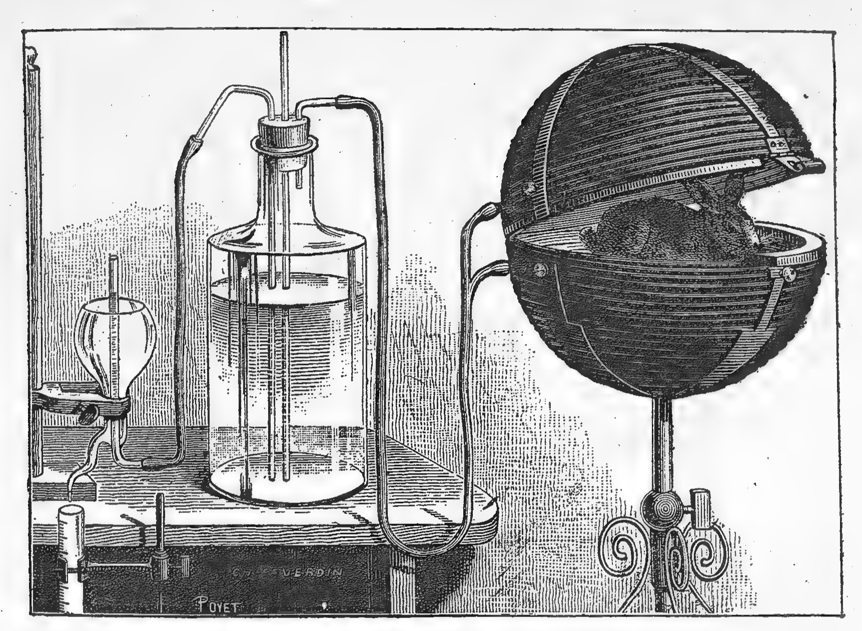


Fig. 528.

l'animal sur un support *ad hoc* dans l'intérieur du récepteur calorimétrique, et on mesure le volume de l'eau qui s'écoule jusqu'au moment où, l'*équilibre thermique* étant atteint, l'écoulement cesse.

De ce volume on déduit la chaleur dégagée par l'animal, un titrage préalable ayant déterminé la *valeur en calories de 1 centimètre cube d'eau écoulée.*

Si le laboratoire où fonctionne l'appareil n'est pas à une température constante, on tient compte de l'influence des variations de température extérieure qui ont pu se produire pendant l'expérience, en déterminant à l'avance, pour le calorimètre employé, le volume d'eau écoulée correspondant à une variation de 1 degré.

M. Richet indique lui-même, dans son mémoire, deux inconvénients présentés par son appareil :

1° Il se fait, dans le récepteur calorimétrique, un *milieu artificiel de température notablement supérieure à la température ambiante*, et, par conséquent, anormale dans une certaine mesure.

2° *L'appareil ne peut à aucun moment rétrograder*, l'eau une fois tombée ne pouvant retourner dans le flacon.

Calorimètre de U. Mosso (1). — Il utilise, comme le précédent, la dilatation de l'air pour la mesure des calories dégagées, mais il n'en présente pas le second inconvénient : il permet, en effet, d'enregistrer non seulement les augmentations, mais aussi les diminutions de température qui peuvent se produire dans une expérience.

Le calorimètre est toujours constitué par une enceinte métallique à double paroi (fig. 529). L'animal est placé dans la cavité interne F et l'espace annulaire I, dont il s'agit de mesurer l'échauffement par la dilatation de l'air y

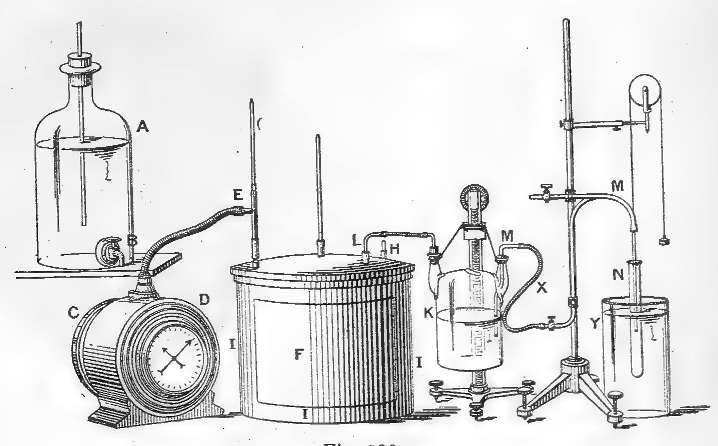


Fig. 529.

contenu, est relié par un tube L à un flacon de Woolf bitubulé et contenant de l'eau. Cette eau, par le tube MM, peut se rendre dans le cylindre flottant N d'un pléthysmographe de A. Mosso (2).

Les niveaux du liquide dans le flacon de Woolf et dans le vase extérieur du pléthysmographe étant maintenus, à l'aide d'un support à vis, sur un même plan horizontal, la pression de l'air reste constante. Dès lors, toute élévation et toute diminution de température se traduiront par une augmentation ou une diminution de l'eau du flotteur N, et ces variations seront exactement inscrites si on munit le contrepoids du flotteur d'un style appuyant sur un cylindre enregistreur.

(H et E sont les tubes d'arrivée et de sortie de l'air servant à la respiration, air dont le mouvement est assuré et réglé par un compteur-aspirateur D dont l'axe est muni d'une roue à augets C actionnée par un écoulement constant d'eau fourni par le flacon de Mariotte A.)

Défectuosités et moyens d'y remédier. — Considérons le cas général représenté figure 524 et examinons les influences diverses qui peuvent fausser l'évaluation de la quantité de chaleur dégagée par un animal en expérience, faite soit par la mesure de l'augmentation de pression, à volume constant,

(1) *Archives italiennes de biologie*, 1890, p. 467.
(2) A. Mosso, *C. R. de l'Académie des sciences*, t. LXXXII, p. 282.

(*méthode manométrique*), soit par la mesure de l'augmentation de volume, à pression constante (*méthode volumétrique*).

a. VARIATIONS DE LA TEMPÉRATURE AMBIANTE ET DE LA PRESSION ATMOSPHÉRIQUE. — Cette cause d'erreur peut être annihilée par l'emploi d'un récipient compensateur dans les calorimètres basés sur la méthode manométrique (D'ARSONVAL, ROSENTHAL, RÜBNER). Pour les appareils ayant recours à la méthode volumétrique (RICHET, U. MOSSO), des expériences préalables devront être faites pour déterminer quantitativement à l'avance l'influence de ces variations et permettre d'effectuer, dans chaque cas, les corrections nécessaires.

b. VARIATIONS DU POUVOIR ÉMISSIF DE LA SURFACE DU CALORIMÈTRE. — Les conditions mêmes de fonctionnement de l'appareil montrent que les résultats obtenus dans des expériences successives pratiquées après sa graduation ne peuvent être exacts que si son pouvoir émissif reste constant. Avec les *métaux polis*, cette condition est réalisée, mais leur pouvoir émissif est très faible et il en résulte une augmentation notable de la température de l'enceinte où se trouve l'animal. Mieux vaut, comme l'a indiqué M. D'ARSONVAL, rendre le pouvoir émissif à la fois plus grand et constant, en recouvrant la surface extérieure d'une couche de peinture à la céruse passée au four et rendue inaltérable.

c. EMPLOI D'UNE SOURCE ARTIFICIELLE POUR ÉTABLIR LA GRADUATION. — La constante e d'un appareil donné ne peut être déterminée qu'à l'aide d'une source de chaleur d'intensité constante et connue. Or, l'action de cette source sur le calorimètre est fonction non seulement de son intensité, mais encore de ses relations avec l'appareil et de sa forme géométrique. Elle peut donc, *à égalité de chaleur produite*, être *différente* dans ses effets observables pour une source artificielle quelconque et pour un animal.

Pour réduire au minimum cette cause d'erreur, on doit, dans les expériences de graduation, se rapprocher le plus possible des conditions présentées par les sources naturelles que l'on se propose de mesurer :

1° Au point de vue de la surface d'émission;

2° Au point de vue de la température de cette surface;

3° Au point de vue de la place occupée dans l'enceinte calorimétrique.

d. ÉLÉVATION DE TEMPÉRATURE DU MILIEU OU EST PLACÉ L'ANIMAL. — Cette élévation de température est inhérente à la méthode. On peut seulement l'empêcher d'être trop grande et d'exercer sur la thermogenèse une action perturbatrice, soit en recourant au moyen déjà indiqué en *b* et donnant des dimensions assez grandes au calorimètre, soit en établissant une ventilation modérée à l'intérieur de l'appareil.

Dans ce dernier cas, il est nécessaire de tenir compte de la température de l'air à la sortie et de sa teneur en *vapeur d'eau*, si l'on veut pouvoir calculer exactement *toute* la chaleur émise par l'animal.

Étalonnage des calorimètres.

Plusieurs procédés ont été mis à profit pour obtenir des sources calorifiques d'intensité constante et connue :

a. ***Refroidissement d'un corps porté à une température supé-***

rieure à celle du calorimètre. — Une masse d'eau contenue dans un récipient, de préférence métallique, est portée à une température T et placée dans l'enceinte calorifique à l'endroit que doit occuper l'animal à expérimenter. Elle séjourne un temps τ au bout duquel sa température est devenue T'.

On a, π représentant le *poids en eau* du système :

$$\textit{chaleur dégagée} = Q = \pi\ (T—T')$$

et, *par unité de temps* :

$$q = \frac{\pi\ (T\text{-}T')}{\tau}.$$

Le refroidissement n'est régulier et l'expression ci-dessus ne représente la chaleur perdue par la source pendant l'unité de temps que dans les expériences de courte durée : à mesure, en effet, que l'expérience se prolonge, le corps se refroidit et l'enceinte s'échauffe. Dès lors, l'excès de la température du corps sur celle de l'air ambiant va en diminuant, et, avec lui, la vitesse du refroidissement (loi de NEWTON).

b. ***Chaleur de condensation d'une vapeur***. — Un jet de vapeur provenant d'un vase contenant le liquide en ébullition est envoyé en jet continu dans un récipient en verre ou en métal, placé au centre du calorimètre.

La quantité de chaleur perdue dans le calorimètre se calcule aisément, si l'on connaît la chaleur de vaporisation (ou de condensation) du liquide et la température finale (t) dans le récipient où il s'est condensé. Une pesée suffit pour en déterminer le poids.

Pour l'eau, on a :

$$Q = P \times (100 - t) \times 537.$$

Le liquide devra être choisi à point d ébullition voisin de 40°, de façon que la surface du récipient soit, pendant l'expérience, à une température voisine de celle des sources naturelles pour lesquelles le calorimètre servira ultérieurement.

c. ***Chaleur de combustion d'un gaz*** (hydrogène, gaz d'éclairage...) ***ou d'un liquide*** (alcool, huile...). — Un courant *constant* de gaz combustible, de chaleur de combustion c connue, est envoyé à un bec brûleur placé dans le calorimètre.

Si l'expérience dure un temps τ et si p représente le poids de gaz brûlé, on a, évidemment :

$$\text{Chaleur dégagée par unité de temps} = \frac{pc}{\tau}\ \text{calories (1).}$$

La mesure du gaz brûlé se fait simplement à l'aide d'un compteur de précision. Le volume, réduit à zéro et à 760 millimètres, multiplié par la densité du gaz, donne le poids p.

Pour l'*hydrogène*, c = 34090 cal. (gr.-deg.) par gramme.

(1) Dans le cas où la combustion, s'effectuant dans un milieu suffisamment riche en oxygène, a lieu dans des conditions telles que la vapeur d'eau formée se condense sur les parois du calorimètre, on n'a pas à en tenir compte dans le calcul de la chaleur dégagée.

Pour le *gaz d'éclairage*, M. A. Witz a donné les chiffres suivants :

A volume constant..............	34.165 cal. (gr.-deg.)
A pression constante..........	34.450 —

1 mètre cube de gaz d'éclairage (à 0° et à 760 millimètres) dégage, en moyenne, 520000 cal. (gr.-deg.).

S'il s'agit d'un liquide brûlé à flamme constante à l'aide d'une lampe ou d'une veilleuse, un calcul analogue au précédent donnera la chaleur dégagée dans l'unité de temps.

Alcool éthylique	$c = 7.054$ cal.
Huile d'olives..........................	$c = 9.355$ cal.

d. ***Chaleur dégagée dans un conducteur traversé par un courant électrique.*** — *La quantité* Q *de chaleur dégagée par seconde* dans un conducteur, de résistance R (*ohms*), à la température de l'expérience, tra-

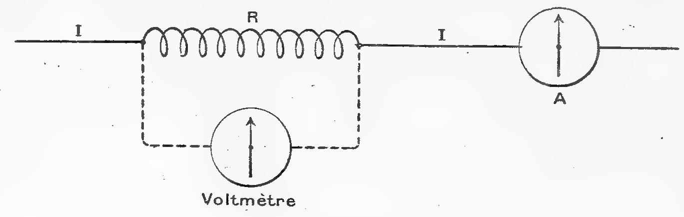


Fig. 530.

versé par un courant d'intensité I (*ampères*), est donnée par la *loi de* Joule :

$$Q = \frac{1}{4,17} I^2R \text{ calories (gr.-deg.)} \qquad (1)$$

ou, E représentant la différence de potentiel (*volts*) aux extrémités du conducteur :

$$Q = \frac{1}{4,17} EI \text{ calories (gr.-deg.)} \qquad (2)$$

$$Q = \frac{1}{4,17} \frac{E^2}{R} \text{ calories (gr.-deg.)} \qquad (3)$$

Pour la quantité de chaleur dégagée *par heure*, on a :

$$Q_1 = \frac{1}{4,17} I^2 R \times 3600 \text{ calories (gr.-deg.).}$$

L'effet Joule constitue une source calorifique artificielle qui présente, sur toutes les autres, de grands avantages pour l'étalonnage des calorimètres : 1° elle peut être maintenue constante et être déterminée avec une grande exactitude ; 2° il est facile d'en faire varier à volonté l'intensité ; 3° par un choix judicieux de la forme et de la résistance du rhéostat d'une part, des constantes du courant d'autre part, on peut se rapprocher beaucoup des conditions de température et de surface présentées par les animaux sur lesquels doivent porter ultérieurement les mesures calorimétriques.

ÉTUVES ET RÉGULATEURS DE TEMPÉRATURE

Par C. SIGALAS

Les sources de chaleur les plus usuellement employées sont dues à des actions chimiques *exothermiques,* et, plus particulièrement, à la combinaison de certains corps, dits *combustibles*, avec l'oxygène. Ces corps peuvent être : *solides* (bois, charbon, houille,...) ; *liquides* (huiles de pétrole, alcool, benzine,...) ; *gazeux* (gaz d'éclairage, acétylène, hydrogène...)

Puissance calorifique. — C'est la quantité de chaleur dégagée par la combustion complète de 1 kilogramme de substance. On la détermine en mesurant, dans la *bombe calorimétrique*, la chaleur Q dégagée par la combustion d'un poids déterminé p de combustible ; on a :

$$\text{Puissance calorifique} = \frac{Q}{p}$$

Voici quelques résultats numériques :

Carbone (charbon de bois fortement calciné)	8080 cal.
Charbon de cornue	8047
Diamant	7770
Soufre	2220
Alcool	7183,6
Hydrogène	34462
— protocarboné	13063
— bicarboné	11857
Oxyde de carbone	2403
Gaz d'éclairage	11180
Pétrole	8900
Bois (valeur moyenne)	2700
Tourbe	3350
Houille	8000
Coke	7250

On peut aussi calculer approximativement la puissance calorifique d'une substance en appliquant la loi suivante :

Loi de Dulong. — *La chaleur dégagée par un combustible est égale à la somme des quantités de chaleur dégagées par la combustion des éléments qui le constituent, en ne tenant pas compte toutefois de la portion d'hydrogène qui peut former de l'eau avec l'oxygène du combustible.*

Cette loi, suffisamment approximative et employée souvent dans la pra-

tique pour les corps de composition connue, s'exprime par la formule suivante :

$$P = 8080\ C + 34462 \left(H - \frac{O}{8}\right)$$

C, H et O représentant les poids respectifs de *carbone*, d'*hydrogène* et d'*oxygène* contenus dans 1 kilogramme de combustible.

Les différents combustibles, solides, liquides ou gazeux, sont utilisés dans les laboratoires à l'aide d'appareils divers (*fourneaux*, *lampes*, *brûleurs*) qu'il n'y a pas lieu de décrire ici.

Parmi les combustibles gazeux, le plus employé est le gaz d'éclairage, dont la flamme peut servir : soit comme *source de lumière*, lorsqu'elle tient en suspension des particules de charbon incomplètement brûlé portées à une température élevée par la combustion du gaz au contact de l'air; soit comme *source de chaleur*, lorsque, dans des brûleurs spéciaux (Bunsen, Wiesnegg...), le gaz qui fournit la flamme est, avant de brûler, mélangé avec une certaine quantité d'air, qui augmente la proportion de carbone brûlé, et, partant, élève la température de la flamme.

Dans les brûleurs ordinaires où l'air se mélange au gaz sous la pression atmosphérique, on peut atteindre jusqu'à 1200° environ. En faisant arriver l'air sous une pression plus considérable, on rend la combustion plus complète encore et on obtient des températures plus élevées (1500°-1600°) (chalumeau ordinaire, lampe d'émailleur, chalumeau de Schlœsing). En remplaçant dans le chalumeau l'*air par de l'oxygène*, c'est-à-dire en supprimant l'azote qui, sans servir en rien à la combustion, s'échauffe aux dépens de la flamme, on obtient des températures plus élevées encore, permettant la fusion du platine (1700°). Enfin, en remplaçant dans le chalumeau le *gaz d'éclairage par l'hydrogène* dont la puissance calorifique est beaucoup plus considérable, on augmente encore la production de chaleur.

Quelle que soit la source de chaleur dont on dispose, on peut l'utiliser : soit *directement*, en l'amenant au contact du corps à chauffer; soit, pour mieux régulariser son action et obtenir une température sensiblement fixe, en interposant entre elle et le corps à chauffer un intermédiaire jouant le rôle de *volant* de chaleur.

Cet intermédiaire peut être : *solide* (toiles métalliques, bains de sable, blocs en fonte ou en terre, etc.); *liquide* (bain-marie contenant : de l'eau des dissolutions salines, de l'huile, de la paraffine, de l'acide sulfurique, du soufre, des métaux fusibles...); *gazeux* (vapeur d'un liquide à sa température d'ébullition ou surchauffée, et, le plus souvent, air chauffé dans une enceinte dont la paroi reçoit directement la chaleur de la source).

ÉTUVES

Aux divers appareils employés pour l'*utilisation médiate* des sources calorifiques, on donne d'une manière générale le nom d'*étuves*. Nous les diviserons en : 1° étuves à liquide; 2° étuves à air; 3° étuves à vapeur.

1° ÉTUVES A LIQUIDE

Ce sont des récipients à double paroi, dont la cavité centrale constitue le bain d'air (ou étuve), et dont l'espace compris entre les deux enveloppes contient un liquide (eau, huile...).

Telle est l'étuve, bien connue, de GAY-LUSSAC (fig. 531), dans l'intérieur

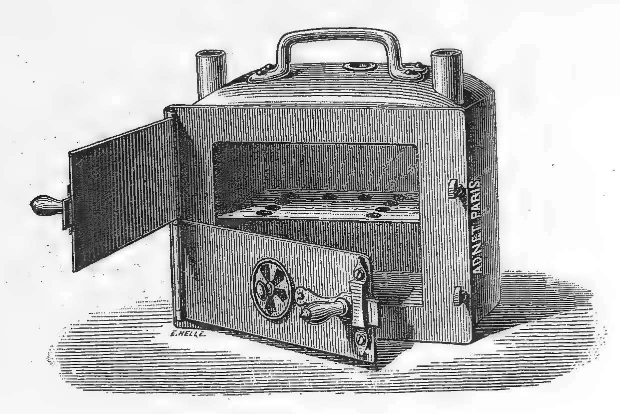


Fig. 531.

de laquelle on peut obtenir, en la plaçant au-dessus d'un foyer de chaleur, une température fixe égale à la température d'ébullition du liquide dont on l'a remplie, ou inférieure à ce point, si on l'a munie d'un régulateur de température.

Cette étuve est employée, dans les laboratoires, pour dessécher les corps à analyser; les ouvertures dont elle est munie permettent d'entretenir et de régler un courant d'air dans la cavité centrale.

L'*étuve auto-régulatrice* du Dr d'ARSONVAL permet d'obtenir une température constante dans la chambre à air intérieure ; elle est très répandue aujourd'hui dans les laboratoires de bactériologie, pour la culture des microbes pour le développement desquels on doit réaliser une température optima, généralement comprise entre 35° et 40°. L'appareil est représenté en coupe sur la figure 532 qui permet de se rendre compte de son fonctionnement.

L'espace compris entre les deux enveloppes étant rempli d'eau *préalablement bouillie* (pour la débarrasser des gaz dissous), on allume les brûleurs (4-4') et on en fait varier la hauteur de flamme en dévissant doucement le tube (12) d'amenée du gaz. Quand le thermomètre marque le degré voulu, on ferme la douille 5 avec le bouchon de caoutchouc surmonté du tube en verre 8 ; l'extrémité inférieure du tube ne doit pas dépasser le bas du bouchon. L'eau, sous l'action de la chaleur, continue à se dilater, monte dans le tube 8, et exerce une pression croissante sur le fond de l'étuve, constitué par une membrane métallique mince analogue à celle des

baromètres anéroïdes (3). Cette membrane se déprime alors et s'avance vers l'orifice d'arrivée du gaz, jouant le rôle de robinet très sensible. La flamme baisse; mais si la flamme baisse, la température de l'eau diminue aussi, et en même temps son volume, le liquide descend dans le tube 8, la pression diminue, la membrane se relève, le gaz arrive en plus grande abondance et chauffe davantage... ; une température d'équilibre s'obtiendra donc par suite de ces mouvements de va-et-vient de la membrane.

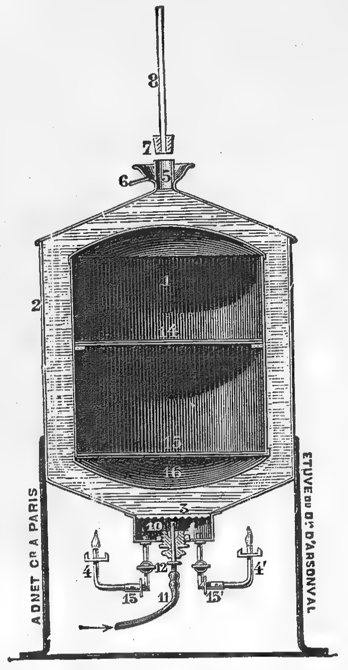


Fig. 532.

Pour fixer une température, lorsqu'on est arrivé à 5° au-dessus du point voulu, on visse légèrement le tube d'arrivée du gaz jusqu'à ce que la flamme baisse et on serre l'écrou 12. Si la température d'équilibre est encore trop haute, on visse un peu plus ; si elle est trop basse, on dévisse légèrement pour augmenter la flamme. Après quelques tâtonnements, la température désirée est obtenue et le réglage est fait une fois pour toutes.

Pour les laboratoires dépourvus de gaz, M. d'Arsonval a fait construire un modèle d'étuve à température constante pouvant être chauffé par un autre foyer : lampe à pétrole, à alcool, à essence... ; nous croyons utile d'en donner la description :

C'est encore une étuve à eau, de même forme que la précédente, mais où la membrane flexible est disposée latéralement et est reliée à la courte branche d'un levier qui porte suspendu à l'extrémité de sa longue branche un cône métallique mobile dans un plan vertical, et susceptible, lors de ses déplacements, d'obturer plus ou moins l'espace cylindrique au-dessous duquel brûle la lampe. L'eau de l'étuve communique avec le récipient à double paroi qui entoure cet espace cylindrique, et c'est là qu'elle s'échauffe au contact des gaz chauds de la flamme. La lampe étant allumée, et le thermomètre marquant le degré voulu, on fixe le tube 8 dans la douille; l'eau, continuant à se dilater, monte alors dans le tube, exerce une pression croissante sur la membrane, qui se bombe en dehors et, par l'intermédiaire du levier, soulève le disque placé au-dessus de la lampe : les gaz chauds s'échappent alors librement dans l'atmosphère et chauffent à peine l'eau qui circule dans la double paroi. Si la température baisse, la membrane se déprime, le cône redescend et retient davantage la chaleur, de façon à faire remonter la température. Une vis de réglage placée au-dessous du levier permet d'obtenir, après quelques tâtonnements, la température fixe que l'on désire (fig. 533).

Si l'on a besoin de maintenir une température plus basse que celle de l'air

ambiant, comme cela peut se présenter pour les moelles rabiques, par exemple, que l'on veut conserver, aux environs de 22°-23°, pendant les chaeurs d'été où on observe fréquemment des températures dépassant 30°, on

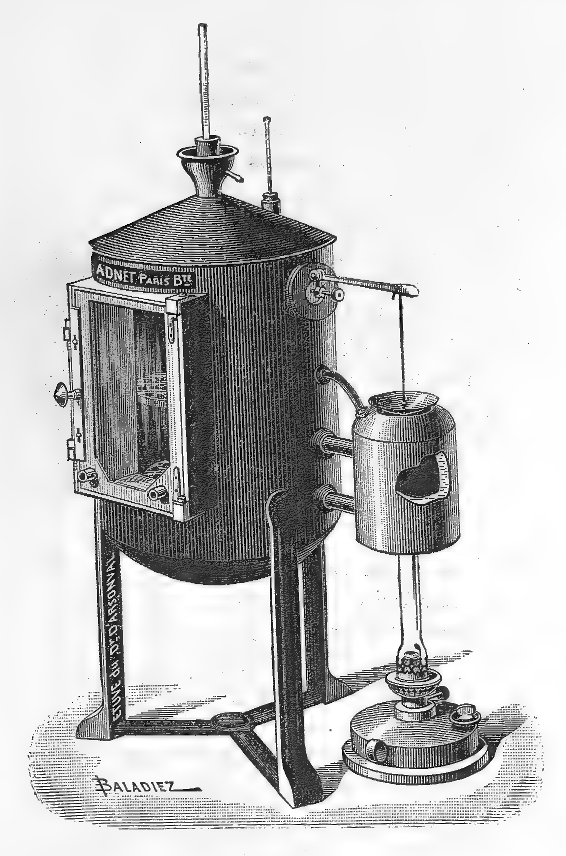


Fig. 533.

ajoute au système ci-dessus décrit un serpentin, contournant les deux corps de l'étuve, que l'on fait parcourir par un courant d'eau de la ville dont la température ne dépasse pas 18° à 20°, par les journées les plus chaudes. Cette eau refroidit l'étuve, et l'on ramène la température au degré voulu à l'aide d'un petit brûleur marchant en veilleuse.

Pour obtenir des températures plus basses (voisines de 0°), on a recours à l'emploi de la glace, en adoptant un dispositif analogue à celui réalisé dans l'étuve de Miquel qui a été spécialement construite pour conserver à zéro les eaux destinées à l'analyse bactériologique (fig. 534).

Cette étuve-glacière se compose de deux boîtes : l'une intérieure E' destinée à recevoir les corps que l'on veut maintenir au voisinage de 0° ; l'autre extérieure E, recouverte d'un feutre isolant, dans laquelle on met la glace. L'eau de fusion de cette dernière s'écoule au dehors par le tube T. Un cou-

vercle C à double paroi, rempli de sciure ou de poudre de charbon de bois, livre passage à un thermomètre t dont le réservoir est dans l'étuve intérieure

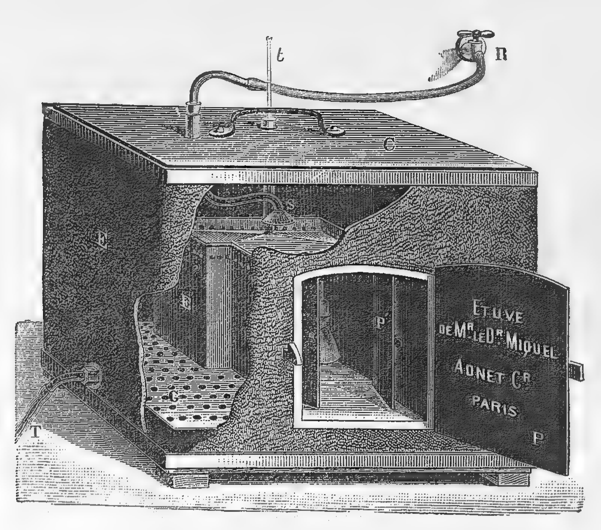


Fig. 534.

et qui permet de lire à chaque instant la température de l'enceinte E'.

Pour obtenir des températures comprises entre 0° et 20° à 25°, on adapte le tube terminé par la pomme d'arrosoir S à un robinet de canalisation d'eau R, ou à un réservoir contenant de l'eau refroidie ; si on ajoute au système le régulateur décrit page 692, on obtient aisément la température fixe voulue.

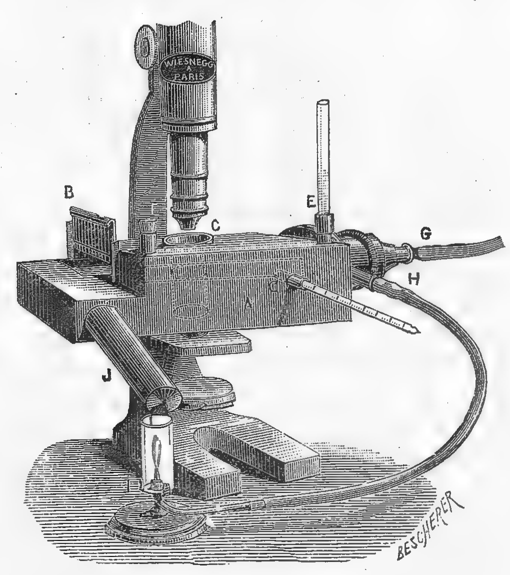


Fig. 535.

Dans les cas, qui se présentent en microbiologie, d'examen au microscope de préparations devant être maintenues à une température constante, on utilise la *chambre chaude de* Vignal qui n'est autre chose qu'une étuve à eau de d'Arsonval, de forme appropriée (fig. 535). L'appareil étant réglé à la température voulue, la lame porte-objet est placée dans la chambre chaude proprement dite qui est munie d'une porte B. L'étuve porte deux ouvertures dont l'axe peut être mis facilement en coïncidence

avec l'axe optique du microscope de façon à permettre l'éclairage de la préparation.

2° ÉTUVES A GAZ

Ces étuves sont : *à simple enveloppe* ou *à enveloppe double.*

L'étuve de Coulier (et celles analogues) est une enceinte métallique en tôle étamée ou en cuivre, munie, à l'intérieur, de tablettes supportant les substances à chauffer et à travers lesquelles circulent régulièrement les gaz chauds qui s'échappent par une cheminée supérieure dont on peut régler l'ouverture et par conséquent le tirage au moyen d'une clef mobile ou *registre* (fig. 536).

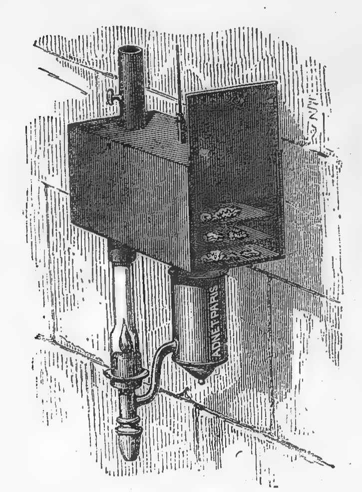


Fig. 536.

L'étuve Pasteur-Schribaux est constituée par une grande armoire en bois munie, à l'intérieur, d'une série de tubes en cuivre disposés verticalement et destinés : 1° à recevoir les produits de la combustion des brûleurs placés au-dessous de l'étuve et à les conduire au dehors de l'enceinte; 2° à déterminer par rayonnement un échauffement uniforme de l'air contenu dans l'appareil. La figure 537 représente ce modèle muni d'un régulateur métallique de Roux.

Dans les étuves à air à double enveloppe, telles que celle de Wiesnegg, on évite le mélange des gaz de la combustion avec l'air que l'on veut chauffer (fig. 538). De plus, en plaçant dans l'étuve un thermo-régulateur, on obtient une température fixe plus constante qu'avec les étuves à enveloppe simple.

L'étuve de Soulard, représentée en coupe (fig. 539), est un excellent modèle d'étuve *à dessiccation* :

Elle se compose d'une caisse en cuivre rouge ABCD dont la partie inférieure AB est chauffée directement par une source de chaleur, et porte à sa partie antérieure une longue ouverture rectangulaire de 1 centimètre de largeur. Cette ouverture est destinée à faire pénétrer l'air extérieur qui arrive par des orifices représentés en O et pouvant se fermer par un registre. La partie supérieure de l'étuve porte en son milieu une petite cheminée H, munie également d'un registre. La porte P est à double paroi et ferme aussi hermétiquement que possible. A 1 centimètre environ de la paroi AB se trouve une plaque EF disposée de façon à forcer l'air venant de l'extérieur à lécher AB et s'échauffer à son contact. Cette plaque empêche également le rayonnement de la paroi chaude AB vers les étagères. Ces étagères L sont pleines, mobiles et disposées en chicane, ainsi que le représente la figure, afin de permettre le renouvellement de l'air dans toutes les parties de l'appareil. Une dernière plaque M se place en avant ou en arrière, dans le même but, suivant la disposition de la dernière étagère. Les flèches indiquent très nettement la circulation de l'air, qui s'établit dès que l'on commence à chauffer. La caisse est

entourée d'une seconde enveloppe IJK à l'intérieur de laquelle circulent les produits de la combustion, qui forment ainsi un matelas de gaz chauds entre l'étuve et l'air extérieur. Grâce au renouvellement très actif de l'air, cet appareil permet une dessiccation rapide à une température inférieure au point d'ébullition du liquide à vaporiser. Sa température peut atteindre et même

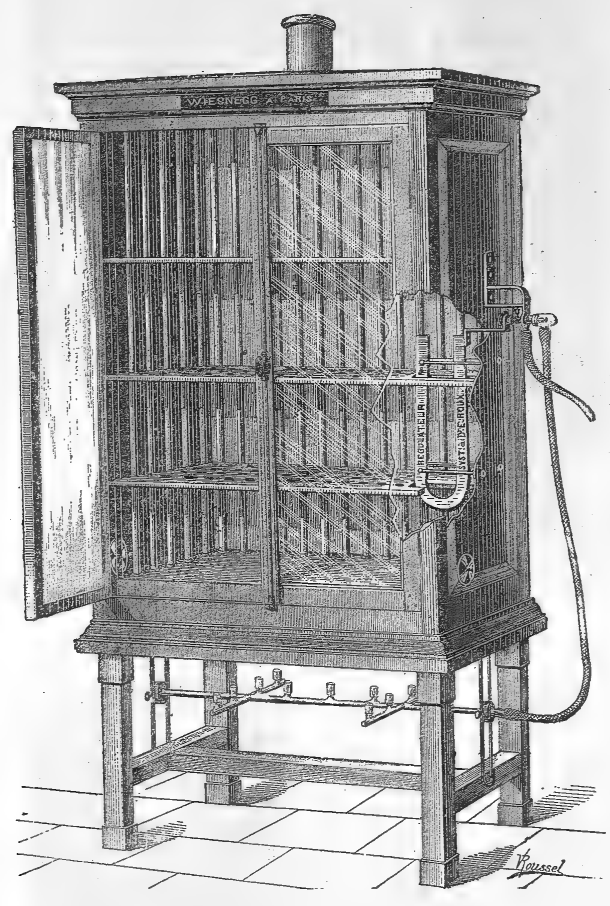


Fig. 537.

dépasser 200 degrés, ce qui en fait une excellente étuve pour la stérilisation des instruments de chirurgie, de bactériologie et des objets de verrerie.

Dans les laboratoires, on se sert d'étuves à air aussi bien pour la *culture* des microbes que pour la destruction de ces microbes (*stérilisation*).

Dans les appareils à air chaud destinés à la stérilisation des objets de verrerie ou des instruments de chirurgie, on obtient aisément des températures supérieures à 150°, en chauffant directement, à feu nu, une enceinte métallique, à simple ou à double paroi : tels sont, par exemple, le *four à flamber* de PASTEUR (fig. 540) et les étuves à air de CHANTEMESSE, POUPINEL, etc.

Fig. 538.

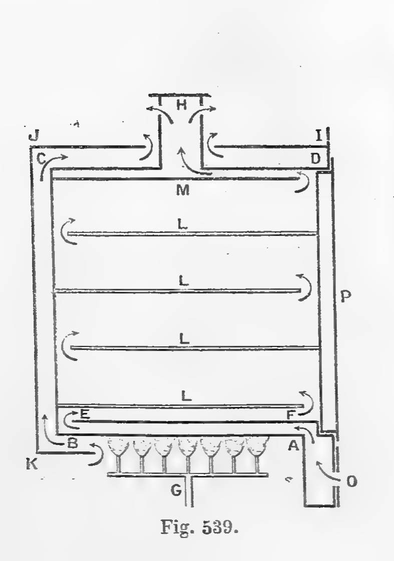


Fig. 539.

Fig. 540.

Signalons encore, à ce point de vue, les appareils destinés à effectuer des calcinations, en chimie analytique, ou à détruire, dans les laboratoires de bactériologie, les animaux ayant servi aux expériences sur les maladies contagieuses.

Ce sont de véritables fours, avec *moufles*, qui permettent d'obtenir une incinération absolument complète. Ils donnent une idée des *fours crématoires* auxquels on a recours quelquefois pour l'incinération des cadavres humains (fig. 541).

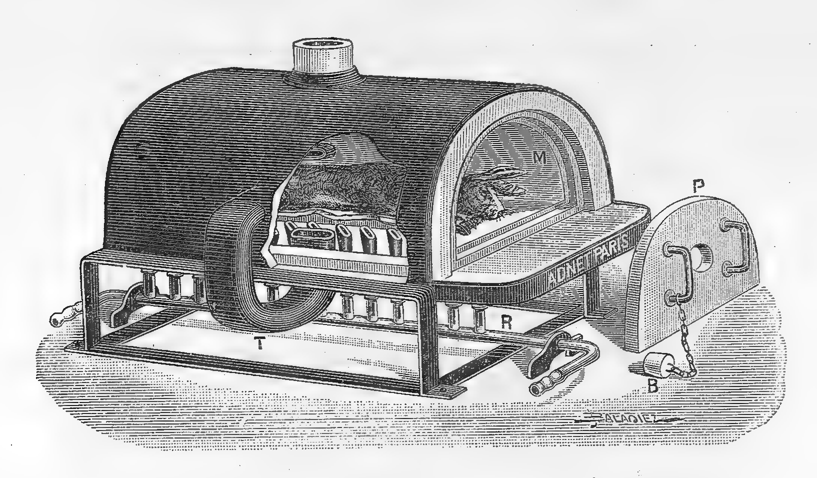


Fig. 541.

Fours crématoires.

On désigne ainsi les appareils qui ont remplacé les bûchers antiques pour la combustion des cadavres. Sans vouloir ici apprécier la crémation, ni au point de vue de l'hygiène, ni au point de vue des convenances sociales, nous dirons que ce mode de destruction des cadavres, contre lequel l'Église s'est prononcée, a été rendu facultatif par les lois allemande, italienne, anglaise et française. Jusqu'ici, Paris est la seule ville de France qui ait profité de l'autorisation accordée par la loi (1).

Voici quelques chiffres empruntés au *Bulletin officiel* de la Ville de Paris :

(1) Quand la combustion dans le four est complète, les cendres sont recueillies à l'aide de pinces en argent et déposées dans une urne qui est fermée à la chaux et scellée d'un cachet aux armes de la ville de Paris. Cette urne est immédiatement : soit inhumée dans une sépulture du cimetière de l'Est (dans lequel est construit le four), soit remise à la famille pour être transportée dans un autre cimetière, soit déposée dans une cave d'un monument spécial appelé *columbarium*.

A Paris, la taxe uniforme à payer par les familles a été fixée à 50 francs, y compris le droit de jouissance pendant cinq ans d'une case pour l'urne funéraire dans le columbarium municipal.

Années.	Incinérations demandées par les familles.	Débris de cadavres provenant des hôpitaux.
1889	49	483
1890	121	2.188
1891	134	2.369
1892	159	2.261
1893	189	2.389
1894	216	2.247

Les fours à crémation doivent être établis de façon telle que la combustion des corps soit rapide et complète ; qu'elle ne dégage ni gaz ni vapeurs fétides ou délétères; enfin, que les cendres puissent être facilement recueillies en totalité.

Four Siemens. — Cet appareil (fig. 542), un des plus parfaits, est celui

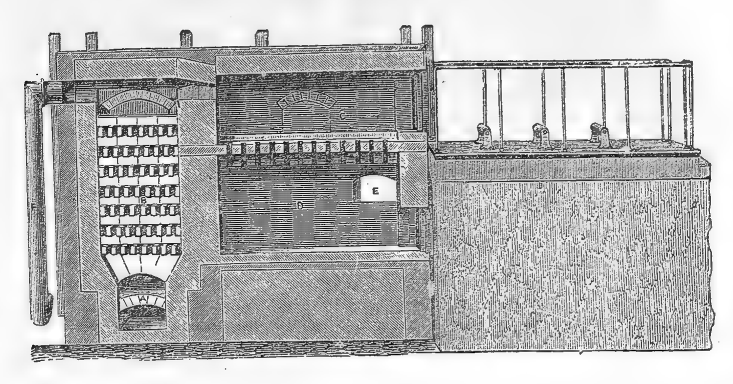


Fig. 542.

qui a servi à la première crémation, celle de Mme Dilke, à Dresde. Il comprend trois parties :

1° La chambre de combustion;

2° Le cendrier;

3° Le régénérateur.

La *chambre de combustion* (C) est d'abord amenée à la température convenable (750 à 800 degrés) par la chaleur fournie par le *régénérateur* (B). Celui-ci comprend plusieurs étages de briques réfractaires et reçoit à sa partie inférieure deux tuyaux (A) amenant l'un du gaz combustible, l'autre de l'air. Un conduit latéral fait pénétrer la flamme qui sort du régénérateur dans la chambre C de laquelle les produits de la combustion s'échappent par a cheminée (F).

Le corps, placé dans la bière, peut, par glissement sur des rouleaux figurés à droite du dessin, être introduit dans la chambre de combustion lorsque les briques réfractaires du régénérateur ont été portées à une température convenable. A partir de ce moment, on ne laisse plus arriver que de l'air par le conduit (A); cet air s'échauffe au contact des briques, provoque et entretient la combustion des corps. L'opération dure entre une heure et une heure et quart.

Four Gorini. — Cet appareil, installé au cimetière de Milan, et qui a fonctionné un certain nombre d'années au Père-Lachaise à Paris, est représenté en coupe verticale (fig. 543).

Le foyer, situé derrière la sole du four qui supporte le cadavre, est alimenté par du bois sec et des fascines. La flamme et les gaz de la combustion suivent

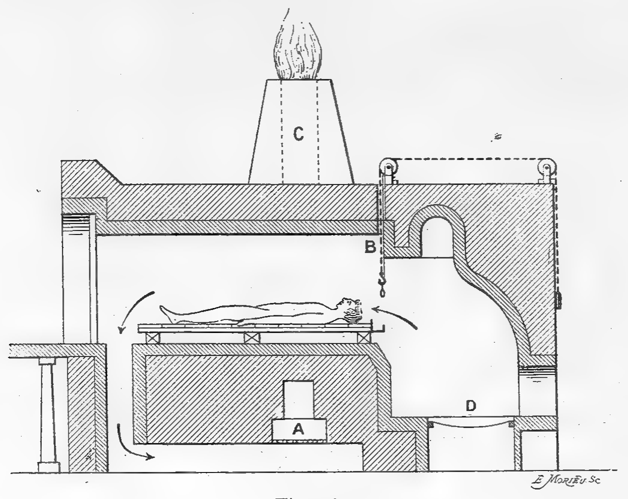


Fig. 543.

la direction indiquée par les flèches. Après avoir entouré le cadavre, ils s'infléchissent verticalement, viennent au-dessous de la sole gagner le conduit A qui les amène dans la cheminée C. Des carneaux vitrés permettent de suivre la marche de la combustion. Une crémation complète exige un temps moyen de une heure trois quarts à deux heures.

Four Toisoul et Fradet. — Ce système fut installé au Père-Lachaise en 1889, pour remédier à la lenteur de l'opération et à la dépense de combustible exigées par le four Gorini. Le combustible est ici du coke. L'appareil comprend trois parties : le *gazogène*, le *récupérateur* et la *chambre de combustion* (fig. 544).

Le gazogène (A), placé dans le sous-sol, est constitué par une cuve rectangulaire munie à sa partie inférieure d'une grille et à sa partie supérieure d'ouvertures servant : l'une (C) de trou de chargement, l'autre (D) de trou de piquage. La combustion du coke dans le gazogène fournit de l'oxyde de carbone.

Le récupérateur (E) permet l'utilisation comme source de chaleur des gaz provenant de la combustion du coke, du cadavre et de la bière. Il est constitué par une série de carreaux en terre réfractaire entre lesquels circulent, d'une part, les gaz de la combustion et, d'autre part, de l'air venant de l'extérieur, qui s'échauffe à leur contact.

La chambre de combustion ou *laboratoire* (G) constitue, en quelque sorte, le troisième étage de cet édifice : c'est une chambre voûtée, en briques, au

milieu de laquelle peut être amené le corps à incinérer et au fond de laquelle débouchent les tubes par lesquels arrivent l'air chaud et les gaz combustibles. Cette chambre est munie de deux portes (H) qui servent à intro-

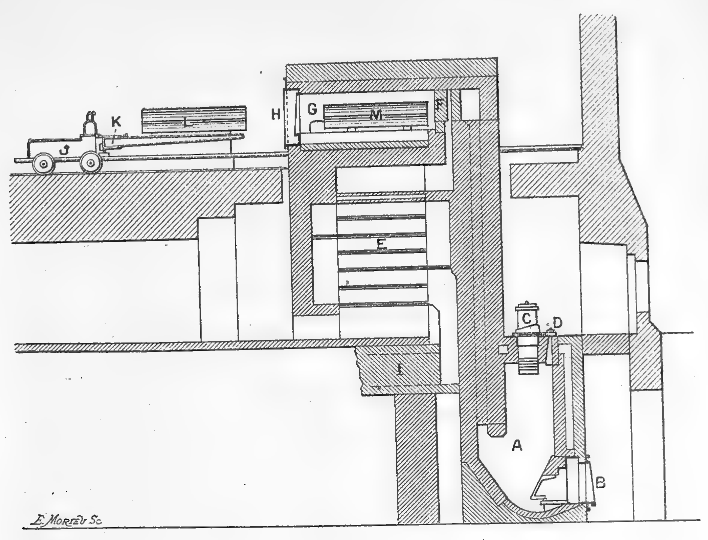


Fig. 544.

duire le cercueil, préalablement placé sur un chariot spécial monté sur rails (J).

L'incinération est complète au bout d'une heure environ. La substitution du coke au bois réalise, d'autre part, une économie notable de combustible.

Four Müller et Fichet. — Cet appareil est en fonctionnement au Père-Lachaise, depuis 1890, concurremment avec le four Toisoul et Fradet. Comme celui-ci, il comprend : un *gazogène*, qui fournit l'oxyde de carbone nécessaire au chauffage; un *récupérateur*, utilisant, pour produire de l'air chaud, la chaleur provenant de la combustion du gaz, du corps à brûler et de la bière; une chambre *laboratoire*, où s'effectue la crémation.

Alors que dans le four Toisoul et Fradet la crémation s'effectue au moyen de l'air mélangé avec les gaz de la combustion, c'est-à-dire appauvri en oxygène, dans le système Müller et Fichet elle a lieu avec de l'air pur, l'air appauvri en oxygène étant utilisé pour le chauffage. Il en résulte une économie de temps assez considérable (1).

3° ÉTUVES A VAPEUR

Ces appareils sont couramment utilisés en médecine, aussi bien pour la stérilisation des liquides (bouillons de culture, etc.), des récipients et

(1) Lorsque le four fonctionne d'une façon continue, il suffit d'un hectolitre de coke, d'une valeur de 3 francs, pour effectuer, *en moins d'une heure*, l'incinération complète d'un cadavre. Il va de soi que la dépense est beaucoup plus considérable pour les fours à marche intermittente.

ustensiles divers servant aux études de bactériologie, que pour la stérilisation des instruments de chirurgie et des objets de pansements et pour la désinfection dans les cas de maladies contagieuses.

Ils utilisent :

Soit *un courant de vapeur d'eau, à la pression atmosphérique normale*, à la température de 100 degrés;

Soit *de la vapeur d'eau, sous pression*, à une température supérieure à 100 degrés.

a. Étuves a vapeur sans pression. — A ce groupe appartient le *stérilisateur à vapeur* de Koch qui consiste en un récipient cylindrique en métal, recouvert d'une couche de feutre, muni d'un couvercle percé de deux ouvertures dont l'une livre passage à un thermomètre et l'autre sert à l'échappement de la vapeur. Le récipient est rempli d'eau jusqu'au quart environ de sa hauteur. A quelques centimètres au-dessus du niveau liquide est fixée une grille sur laquelle on place les objets à stériliser. L'eau étant amenée et maintenue à l'ébullition par une source de chaleur convenable, la température de la vapeur, dans toute la hauteur du cylindre, se maintient aux environs de 100°, grâce au manchon de feutre qui empêche le refroidissement et à l'étroitesse du trou de sortie de la vapeur qui s'oppose à toute rentrée d'air (fig. 545).

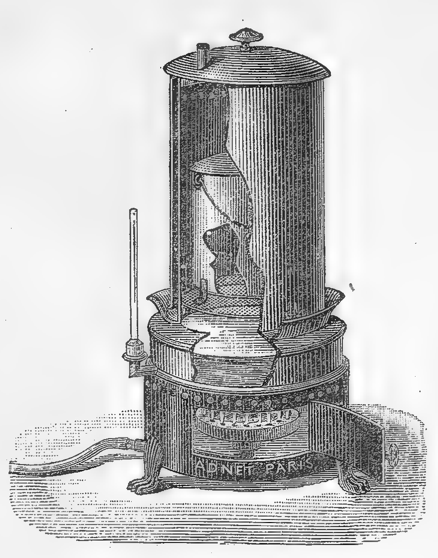


Fig. 545.

b. Étuves a vapeur sous pression. — Le type de ces appareils est la classique *marmite de Papin*; l'autoclave de Chamberland (fig. 546), que nous allons décrire, n'en constitue qu'un perfectionnement.

Il se compose d'un récipient cylindrique en cuivre muni d'un couvercle mobile en bronze susceptible de le fermer hermétiquement, grâce à une rondelle en caoutchouc sur laquelle on le comprime fortement à l'aide de boulons métalliques.

Sur son couvercle sont fixés :

1° Un robinet d'échappement;

2° Un manomètre à indications thermométriques;

3° Une soupape de sûreté.

A l'intérieur se trouve un panier en toile métallique destiné à recevoir les objets à stériliser.

Pour se servir de l'autoclave, on verse dans la marmite une quantité d'eau suffisante pour le remplir jusqu'à environ 10 centimètres du fond, on met en place le panier métallique, on visse le couvercle et on allume la rampe à gaz,

le robinet d'échappement étant ouvert. Lorsqu'on voit se former un jet continu de vapeur, on ferme ce robinet; aussitôt l'aiguille du manomètre indique que la température s'élève au-dessus de 100°. Lorsque le manomètre indique la pression correspondante à la température que l'on veut obtenir,

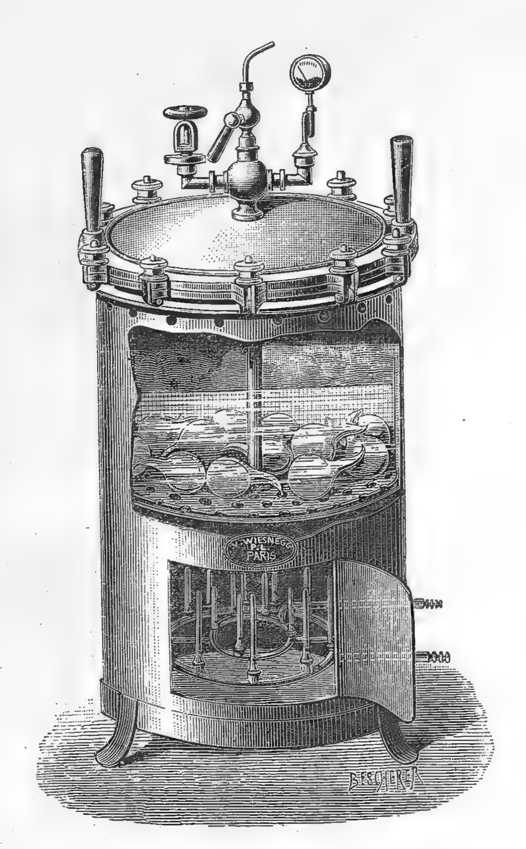


Fig. 546.

on règle la hauteur de flamme du gaz de façon à maintenir la pression constante.

Au bout d'un temps convenable, on ferme le robinet d'arrivée du gaz; la pression retombe bientôt à 0. A partir de ce moment, on peut ouvrir le robinet d'échappement; l'air rentre alors avec un bruissement particulier et on peut dévisser le couvercle.

Le tableau suivant, déduit des tables de Regnault, donne les températures correspondant aux différentes pressions du manomètre dans l'autoclave (1) :

(1) 1 atm. équivaut à la pression exercée par : $0^{m},760$ de mercure, ou par $10^{m},33$ d'eau, soit $1^{kg},033$ par centimètre carré.

1 kil. par centimètre carré équivaut à la pression exercée par $0^{atm},968$, ou par $0^{m},735$ de mercure, ou par 10 mètres d'eau.

TEMPÉRATURES en degrés centigr.	PRESSIONS en kilogrammes déduction faite de la pression atmosphérique.	TEMPÉRATURES en degrés centigr.	PRESSIONS en kilogrammes déduction faite de la pression atmosphérique.	TEMPÉRATURES en degrés centigr.	PRESSIONS en kilogrammes déduction faite de la pression atmosphérique.
100	0	120	1	164	6
103	0,116	127	1,500	170	7
105	0,199	133	2	174	8
110	0,422	143	3	179	9
112	0,530	150	4	183	10
115	0,693	158	5		

Étuves à désinfection.

C'est surtout pour la pratique de la *désinfection*, c'est-à-dire de la destruction des germes pathogènes contenus dans les objets de literie, linges, vêtements de malades, etc., qu'on doit avoir recours à l'emploi de la vapeur d'eau, de préférence à celui de la chaleur sèche, étant donnée la grande résistance des spores à l'action, même très prolongée, de l'air sec et chaud.

On a employé dans ce but, comme pour la stérilisation dans les laboratoires :

1° Soit un courant continu de vapeur d'eau à la pression normale;

2° Soit la vapeur saturée sous pression au-dessus de 100 degrés.

Étuves à vapeur sans pression. — Les étuves de la première catégorie, préconisées en Allemagne par certains hygiénistes, sont construites sur le type du *stérilisateur à vapeur de Koch* que nous venons de décrire : un courant de vapeur d'eau à 100° traverse l'enceinte qui contient les objets à stériliser.

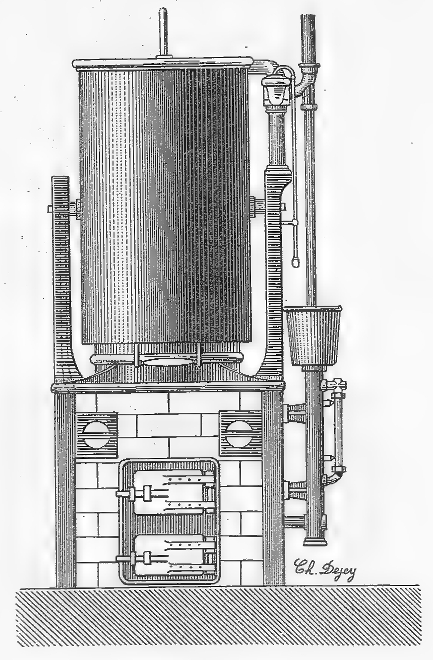


Fig. 547.

L'étuve de Rietschel et Henneberg représentée fig. 547 se compose d'un cylindre en tôle galvanisée, à fonds plats, entouré de substances isolantes et mobile autour de deux tourillons portés par deux supports en fonte. Ces tourillons creux communiquent : l'un avec un tuyau partant de la chaudière sur laquelle sont fixés les supports de l'étuve et servant à amener dans l'étuve un courant de vapeur à 100°, l'autre avec un tuyau d'échappement. Un niveau d'eau et un tube à entonnoir servant à l'introduction de l'eau nécessaire complètent le système. Un petit tuyau branché à la base du tuyau

d'échappement ramène dans l'entonnoir la vapeur d'eau condensée au sortir de l'étuve.

Pour faire fonctionner l'appareil, on place le cylindre dans la position horizontale, on y introduit la cage métallique renfermant les objets à désinfecter, on remet en place le couvercle et on redresse l'étuve dans la position verticale. On allume alors le feu et, lorsque la vapeur a traversé la chambre pendant un temps suffisant, on retire les objets et on les soumet au séchage.

On a eu aussi recours, pour la désinfection, à la *vapeur d'eau surchauffée sans pression, à une température supérieure à 100 degrés.*

Dans le modèle de Dobroslavine, par exemple, la vapeur est amenée au contact des objets à épurer, par un tuyau qui part du sommet de la chaudière et traverse, avant d'arriver à l'étuve, une dissolution bouillante de sel marin, où elle se surchauffe jusque vers 105°-108°. Des expériences faites par M. E. v. Esmarch, il résulterait que « la vapeur surchauffée, à la pression normale, se comporte, dans une certaine mesure, comme l'air sec à la même température; son pouvoir stérilisant ne commence à se manifester d'une manière efficace qu'au-dessus de 140° à 150° ».

Quant aux étuves utilisant pour la désinfection un mélange d'air chaud et de vapeur d'eau (système de Ramsing et Leth), les expériences de Salomonsen et Levison et celles de Max Gruber ont montré que « ni au point de vue de la destruction des microorganismes, ni au point de vue de la rapidité de la pénétration de la chaleur à l'intérieur des objets à désinfecter, le mélange d'air et de vapeur d'eau ne présente de supériorité sur l'air sec chaud ».

Étuves à vapeur sous pression. — Nous ne décrirons ici qu'un des meilleurs types, celui de MM. Geneste et Herscher, qui permet de faire agir

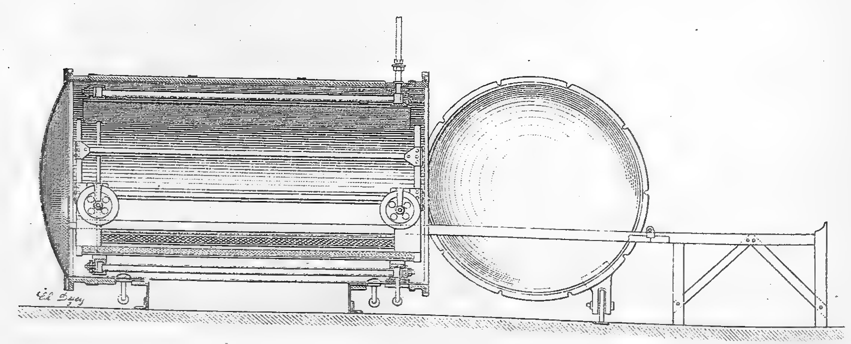


Fig. 548.

directement, sur les objets contaminés, la vapeur d'eau saturante, sous pression, à une température de 108° à 109°, pouvant même atteindre 115° et au delà.

L'étuve (fig. 548) consiste en un cylindre en tôle, horizontal, recouvert

d'une enveloppe isolante extérieure et fermé à ses deux extrémités par deux portes circulaires, à fermeture hermétique et servant : celle située à l'avant, à l'introduction d'un chariot roulant sur rails sur lequel sont placés les objets à désinfecter ; celle placée à l'arrière, à livrer passage au même chariot, une fois la désinfection terminée. — A l'intérieur sont disposées deux batteries de surfaces chauffantes, l'une à la base, l'autre au sommet, qui reçoivent la vapeur par une prise spéciale qui les relie au générateur de vapeur. L'étuve est munie, en outre, de robinets d'échappement, de manomètres et de soupapes de sûreté.

Pour faire fonctionner l'étuve, on envoie d'abord la vapeur dans les surfaces chauffantes, afin d'éviter les condensations pendant l'opération. Lorsque l'étuve est chaude, on introduit le chariot chargé, et, après avoir refermé la porte d'entrée, on donne accès à la vapeur dans l'enceinte de l'étuve. On maintient ouvert le robinet d'échappement, jusqu'à ce que tout l'air contenu dans l'étuve ait été expulsé. On ferme alors le tuyau de sortie et on laisse monter la pression jusqu'à environ une demi-atmosphère.

La température correspondante (108°-109°) a été reconnue suffisante pour assurer la désinfection. Après quinze minutes, on arrête l'admission de la vapeur dans l'enceinte de l'étuve, tout en la maintenant dans les batteries chauffantes, et on entre-bâille la porte de sortie pour laisser entrer l'air dans l'étuve : le séchage des objets s'effectue ainsi, dans l'étuve même, en un temps qui ne dépasse pas un quart d'heure.

Bien que ce ne soit pas ici le lieu d'étudier comparativement les divers modes de stérilisation et de désinfection par la chaleur, nous rappellerons les conclusions auxquelles est arrivé I. Straus (1) après une revue critique très complète des nombreuses expériences faites sur ce sujet.

A cause de la résistance de certaines spores (bactéridie charbonneuse, par exemple) à l'action, même prolongée, de la chaleur sèche, l'air sec et chaud est un mauvais moyen de stérilisation, et par conséquent de désinfection. Si, à l'aide de ce procédé, on veut désinfecter sûrement, c'est-à-dire détruire tous les germes, il faut recourir à des températures tellement élevées et prolongées qu'elles endommagent les objets qu'on veut ainsi désinfecter. Enfin, le temps nécessaire à la désinfection est extrêmement long à cause de la lenteur de pénétration de la chaleur sèche à l'intérieur d'objets poreux et volumineux. Toutes ces expériences (Koch, Vallin, Salomonsen, etc...) condamnent sans appel les étuves à désinfection par l'air chaud.

« Les appareils employant la vapeur sous pression donnent une stérilisation plus rapide et plus certaine que ceux utilisant le courant de vapeur à 100° (ou au-dessus) à la pression normale.

« Un séjour de quinze à vingt minutes dans la vapeur saturée sous pression à 110°-115° suffit pour la stérilisation d'objets volumineux, poreux et mauvais conducteurs. Au bout de ce temps, toutes les bactéries et toutes les spores connues sont détruites, même les spores si résistantes du bacille du

(1) *Archives de médecine expérimentale*, 1890, p. 335.

foin, de la terre et de la pomme de terre, qu'un séjour de deux heures dans la vapeur courante à 100° ne tue pas. Les partisans des appareils à pression ambiante font remarquer, avec raison, que les virus et les microbes pathogènes, actuellement connus, offrent tous une résistance à la chaleur moins grande que les microorganismes dont il vient d'être question, et que la plupart sont déjà détruits par la chaleur humide à des températures inférieures à 100°. Les spores du charbon sont sûrement tuées dans la vapeur à 100° au bout de peu de minutes, celles du bacille de la tuberculose, en quinze à trente minutes. Seules, les spores de la bactéridie du charbon symptomatique exigent une désinfection plus longue. Ils en concluent que, pour la pratique, l'action de la vapeur d'eau à 100°, pendant une demi-heure, peut être considérée comme suffisante à la désinfection.

« La vapeur d'eau sous pression, à 110°-115°, agissant pendant quinze ou vingt minutes, détruit tout ce qui a vie. Elle assure une désinfection radicale et certaine, et, en pareille matière, la certitude absolue est une chose inappréciable. Son action est non seulement sûre, mais rapide ; avantage précieux, surtout en temps d'épidémie (expériences de Grancher et Gariel, Vinay, Nocard, Martin...).

« Les tissus soumis à l'action de la vapeur sous pression ne subissent pas, d'une façon appréciable, de détérioration plus grande que par la vapeur à 100°. Il y a cependant, pour les linges imbibés de sang ou de pus, l'inconvénient de la production de taches indélébiles ; mais on peut le prévenir par une immersion préalable des linges mouillés dans une solution de permanganate de potasse.

« *En résumé, pour la pratique des desinfections, aussi bien que pour la stérilisation dans les recherches de laboratoire, la même solution s'impose : l'emploi de la vapeur d'eau saturée, soit à l'état de courant, à la pression atmosphérique, soit, de préférence, sous pression, à la température de 110-120 degrés* ».

Couveuses.

Chez les enfants nés avant terme, et dans d'autres cas pathologiques (cyanose, œdème, sclérème), on voit, lorsqu'on les laisse respirer dans le milieu ambiant, la température tomber jusqu'à 30° et au-dessous. L'expérience a montré que pour conserver la vie de l'enfant et pour l'amener progressivement à la température physiologique normale (37°), la meilleure méthode consiste à le placer dans une enceinte à température constante et voisine de celle du milieu où il vivait avant sa naissance. Ce n'est qu'en le faisant vivre et respirer pendant un certain temps dans un air chaud, sans cesse renouvelé, qu'on peut lutter efficacement contre l'hypothermie et l'affaiblissement. On appelle couveuses les enceintes réalisant ces deux conditions : *température constante* et *ventilation suffisante*.

C'est le professeur Denucé (de Bordeaux) qui fit construire, dès 1857, la première couveuse pour enfants : elle consistait en une baignoire à double paroi dont l'intervalle était rempli d'eau chaude. Vinrent ensuite plusieurs

modèles plus ou moins calqués sur celui de Denucé, tels que le berceau incubateur de CRÉDÉ (de Leipzig), sur lesquels il n'y a pas lieu d'insister.

Couveuse de Tarnier. — Un perfectionnement notable fut apporté en 1880 par le professeur TARNIER. Sa couveuse, modifiée par AUVARD, consiste en une caisse en bois dont les dimensions intérieures sont : hauteur, $0^m,48$; largeur, $0^m,44$; longueur, $0^m,62$.

L'intérieur de la caisse est divisé en deux compartiments superposés, par une cloison horizontale incomplète. Dans le compartiment du bas, on introduit un réservoir de 10 litres environ rempli d'eau bouillante; dans celui du haut, garni de coussins et fermé par un couvercle vitré, est placé l'enfant. L'air pénètre dans l'appareil par une ouverture pratiquée dans le compartiment inférieur, s'échauffe au contact de la bouillotte, se charge de vapeur d'eau au contact d'une éponge mouillée placée sur la cloison de séparation et sort enfin, après avoir servi à la respiration, par un orifice pratiqué dans le couvercle et muni d'une hélice qui indique par son mouvement si le courant d'air nécessaire à la ventilation se fait normalement. Un thermomètre permet de juger à chaque instant si la température est suffisante; lorsqu'elle descend au-dessous du degré fixé, on remplace l'eau de la bouillotte par de l'eau chaude.

Couveuse-berceau de Diffre. — L'assujettissement énorme du remplissage de la bouillotte est ici évité. La *chambre de l'enfant* contient : un lit mobile formé par une simple toile métallique, une cuvette à éponge pour humidifier l'air et un thermomètre (fig. 549).

La *source de chaleur* est une chaudière A contenant de l'eau et munie d'un tube-siphon qui fait communiquer sa partie supérieure avec l'air extérieur. Une lampe à pétrole entretient l'eau à une température voisine de l'ébullition et permet, par un simple réglage de la mèche, de maintenir le thermomètre intérieur au degré fixé.

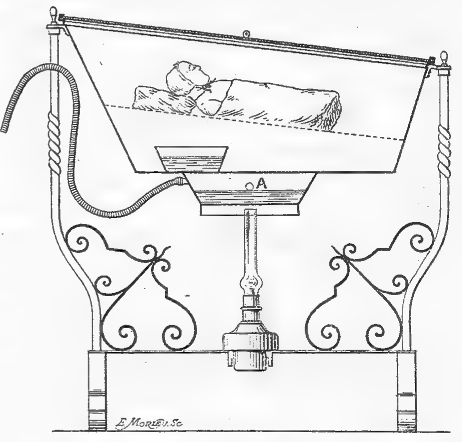


Fig. 549.

Grâce au tube-siphon communiquant avec l'atmosphère, l'eau vaporisée se condense et se ramasse dans la partie déclive de telle façon que, la déperdition de l'eau étant presque nulle, la même eau peut servir presque indéfiniment.

L'aération s'obtient à l'aide de deux ouvertures pratiquées en des points diamétralement opposés de la chambre.

Enfin, la constitution entièrement métallique de l'étuve et sa forme intérieure ne présentant ni fissures, ni saillies, en permettent une stérilisation complète et rapide.

Couveuse Lion. — Au point de vue des conditions essentielles que doit réunir une bonne couveuse, à savoir :

1° Maintien d'une température constante ;

2° Ventilation régulière ;

3° Possibilité de désinfection ;

cet appareil nous paraît réaliser tous les *desiderata.*

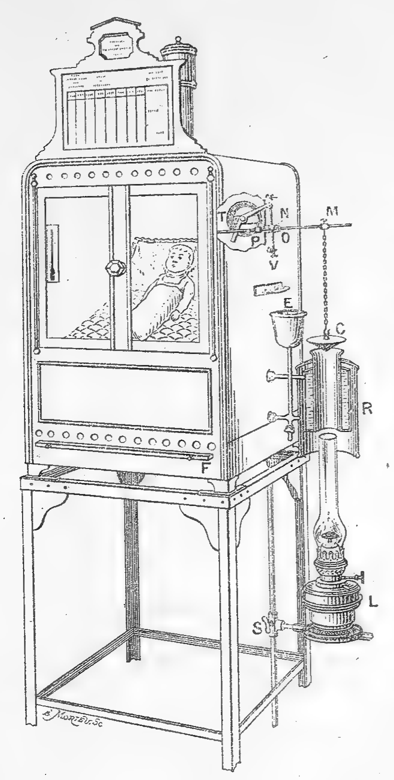


Fig. 550.

Comme on le voit dans la figure 550, il comprend :

1° La *chambre-étuve* destinée à recevoir l'enfant ; elle est à parois en tôle galvanisée et présente une face vitrée permettant la surveillance continue de l'enfant. Une quarantaine de trous percés dans la base de l'appareil servent d'entrée à l'air extérieur qui s'échauffe au contact d'un serpentin de cuivre, sert à la respiration et s'échappe par une cheminée d'appel placée à la partie supérieure.

2° L'*appareil de chauffage* ; il est constitué par un serpentin en cuivre de $0^m,10$ de diamètre enroulé à la partie inférieure de la chambre et parcouru par un courant d'eau chaude obtenu à l'aide du thermo-siphon figuré en R, qui est soumis directement à l'action de la source de chaleur (bec de Bunsen, lampe à pétrole).

3° Un *régulateur de température*, susceptible de fonctionner avec les différents modes de chauffage.

En voici le fonctionnement : le cône C étant baissé et fermant complètement l'ouverture du canal intérieur du récipient d'eau R, le foyer L chauffe les parois internes et externes de ce récipient, la température s'élève.

A mesure que la température s'élève dans l'enceinte, le thermomètre métallique T placé à l'intérieur de la couveuse se dilate et, par l'intermédiaire du levier OM' soulève le disque C ; les gaz chauds s'échappent alors à l'extérieur en ne cédant qu'une très faible portion de leur chaleur aux parois du thermo-siphon : il y a donc abaissement de température.

A l'aide de la vis de réglage V qui permet d'élever ou d'abaisser le cône, on élève ou on abaisse la température jusqu'à ce qu'elle ait atteint la température constante que l'on désire, température qui se maintient ensuite par le mécanisme que nous venons d'indiquer.

RÉGULATEURS DE TEMPÉRATURE

Sauf les cas où, comme dans les bains-marie et dans les autoclaves, la température à réaliser est celle à laquelle se fixera nécessairement, au bout d'un certain temps, le liquide ou la vapeur, quelle que soit l'intensité de la source calorifique (température d'ébullition du liquide sous la pression normale ou sous une pression supérieure), il est nécessaire de prendre certaines précautions si l'on veut obtenir des bains liquides ou gazeux à une température déterminée.

Deux cas sont à considérer :

1° La température doit être maintenue *aux environs* d'un degré déterminé ;

2° La température doit être maintenue *à un degré fixe.*

La première condition pourra être réalisée simplement, sans appareil spécial, en faisant varier la distance de la source de chaleur à l'étuve. On arrivera ainsi, après quelques tâtonnements, à un résultat satisfaisant si l'appareil est placé dans une pièce à température sensiblement constante.

Telle est l'étuve de Salomonsen constituée par une boîte métallique dont les parois latérales et supérieures sont recouvertes d'un feutre isolant et dont la paroi inférieure est chauffée directement soit par une veilleuse à huile, soit par une petite lampe à essence. Le réglage (*entre 30° et 40°*) s'obtient en faisant varier : d'une part, la hauteur de la flamme, et, d'autre part, sa distance au fond de l'étuve.

Dans le second cas, celui d'une température constante, on doit avoir recours à des appareils spéciaux, dits thermo-régulateurs, qui ont pour but d'augmenter l'action calorifique de la source lorsque l'étuve se refroidit et de la diminuer lorsqu'elle s'échauffe.

La plupart de ces régulateurs utilisent les variations de volume subies par les corps soumis à des variations thermiques et les actions mécaniques qui en sont la conséquence. On peut les diviser en :

a. Appareils utilisant la dilatation d'un corps solide;
b. Appareils utilisant la dilatation d'un corps liquide;
c. Appareils utilisant la dilatation d'un corps gazeux.

a. RÉGULATEURS A CORPS DILATABLE SOLIDE

Nous citerons comme exemple le régulateur de Roux (fig. 551) basé sur l'inégale dilatabilité des métaux sous l'action de la chaleur. Il est formé de deux barres métalliques, l'une en acier, l'autre en zinc, soudées ensemble et recourbées en forme d'U de façon que le zinc plus dilatable que l'acier soit à l'extérieur : dans ces conditions, et la branche A étant seule mobile, toute élévation de température tendra à rapprocher la branche mobile A de la branche fixe, et tout abaissement de température, au contraire, en provoquera l'écartement.

Une tige fixée en A transmet ces mouvements à un piston K à ressort qui livre passage à une quantité de gaz plus ou moins grande, suivant qu'il est plus ou moins enfoncé dans la matrice métallique B à laquelle sont soudés les tubes d'amenée et de sortie du gaz (D et C).

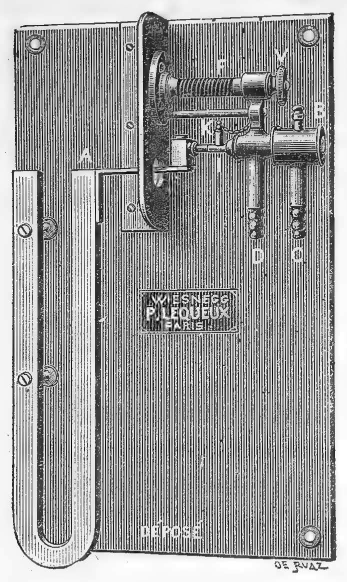


Fig. 551.

Lorsque la température tend à augmenter, la branche A se rapprochant de la branche fixe appuie moins fortement sur le piston K et celui-ci ferme alors en partie le tuyau d'arrivée; si, au contraire, la température tend à baisser, la branche A vient presser sur le piston et laisse passer plus de gaz.

Pour régler une température, le brûleur est d'abord allumé; puis, lorsque le thermomètre de l'étuve marque quelques degrés au-dessous du point voulu, on agit sur la vis V de façon à faire baisser sensiblement la flamme; si la température continue à monter, on dévisse un peu plus; si au contraire la température baisse, on revisse légèrement. Après deux ou trois manœuvres de la vis, la température reste stationnaire.

Ajoutons que l'extinction du brûleur est rendue impossible par suite de l'existence dans le régulateur d'un petit trou, indépendant du piston, par lequel passe, en tout temps, une quantité de gaz suffisante pour faire brûler les becs en *veilleuse*.

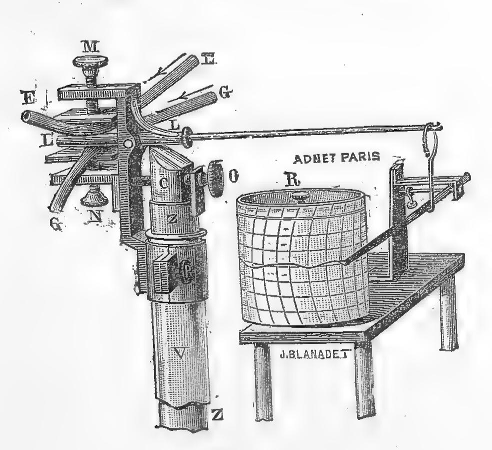


Fig. 552.

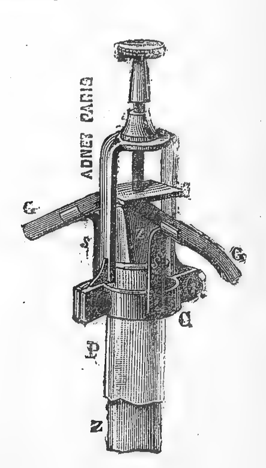


Fig. 553.

Sur le même principe reposent les régulateurs de Miquel. Celui représenté figure 553 est composé d'une tige de zinc dans un tube en fer muni d'un collier C soutenant un étrier dans lequel peut se mouvoir une vis V terminée en bas

par un plan. Le tube qui conduit le gaz au brûleur passe en G G′, entre ce plan et la partie supérieure du zinc, et peut être écrasé plus ou moins, suivant les positions respectives de ces deux pièces.

L'appareil dessiné figure 552 peut servir au réglage des enceintes à des températures inférieures à la température ambiante.

Un courant d'eau froide est amené à l'étuve par le tube E E′; le gaz est conduit au brûleur par le tube G G′. On voit tout de suite que le soulèvement de la pièce C aura pour effet de comprimer le tube à gaz et de décomprimer au contraire le tube à eau froide. Dans le cas où la température vient à baisser, le levier L′, sous l'action du ressort L qui n'est plus contre-balancée par la résistance de la pièce sous-jacente C, tend à ouvrir le tuyau à gaz et à comprimer le tube à eau froide. La vis O permet de déplacer le point d'appui du barreau de zinc et ainsi de faire varier la sensibilité du régulateur.

b. RÉGULATEURS A CORPS DILATABLE LIQUIDE

Dans certains cas, c'est le liquide même de l'étuve qui sert à la régulation. La description déjà donnée de l'étuve auto-régulatrice de d'Arsonval nous dispense d'insister sur ces régulateurs directs.

Le plus souvent, le liquide dilatable est enfermé dans un récipient indépendant à parois rigides, qui est placé dans l'étuve à côté du thermomètre; les variations de volume de ce liquide sont utilisées pour augmenter ou diminuer l'arrivée du gaz. Nous décrirons rapidement quelques modèles parmi les plus employés.

Régulateur à membrane de d'Arsonval. — Le liquide (huile d'olive et pétrole) est enfermé dans le récipient 1 (fig. 554). On le laisse communiquer librement avec l'atmosphère tant que la température de l'étuve est au-dessous du degré voulu. Quand ce degré est atteint, on ferme le tube au moyen du robinet à pointe (3). A partir de ce moment, toute élévation de température aura pour effet de faire bomber la membrane métallique (4) et de l'appliquer contre l'orifice du tube d'amenée du gaz (5), qui a été fixé, à l'aide du contre-écrou dessiné sur le tube 5, à une très petite distance de la membrane.

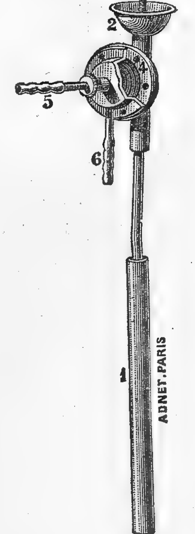


Fig. 554.

Régulateur de Chancel. — Il est représenté figure 555. Les flèches indiquent le sens du courant de gaz qui traverse l'appareil et va brûler sous l'étuve. Lorsque le régulateur a été placé dans l'enceinte à maintenir à une température constante, et que la température a atteint le point désiré, on fait arriver le mercure, en agissant sur la vis latérale, jusqu'à affleurer à l'extrémité du tube en verre intérieur par lequel le gaz va dans le brûleur. Si la température monte au-dessus du degré fixé, le mercure se dilate davantage et obture de plus en plus le

tube de sortie, mais alors la flamme baisse et la température descend; si elle descend trop, le tube est complètement ouvert et la flamme prend son maximum de hauteur et par conséquent de chaleur, qui fait remonter aussitôt la température de l'enceinte. Une ouverture de sûreté pratiquée sur le tube intérieur permet au brûleur de ne pas s'éteindre et de brûler en veilleuse même lorsque le mercure est assez dilaté pour obturer complètement l'orifice inférieur du tube de sortie du gaz.

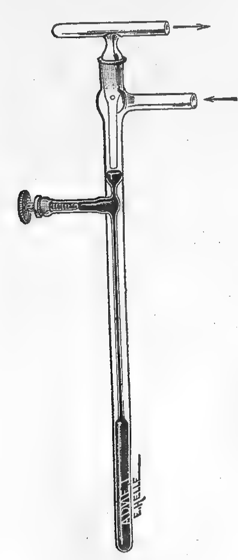


Fig. 555.

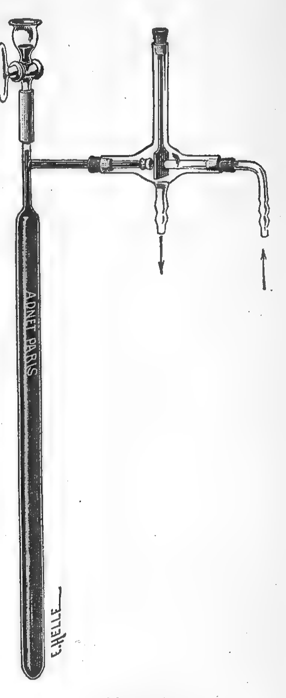


Fig. 556.

Régulateur de Schlœsing. — Le récipient en verre qui contient le mercure est muni d'un tube latéral fermé par une membrane de caoutchouc (fig. 556).

Le gaz traverse le système suivant le sens indiqué par les flèches.

Lorsque la température de l'étuve dans laquelle est placé le régulateur a atteint le degré voulu, on ferme le robinet supérieur. A partir de ce moment, si la température monte, le mercure, en se dilatant, fera bomber la membrane de caoutchouc qui appliquera la petite languette mobile contre l'orifice d'entrée du gaz et diminuera la flamme. D'ailleurs, un petit trou pratiqué dans le tube d'arrivée laissera toujours passer une quantité suffisante de gaz pour qu'il n'y ait jamais extinction.

Il est facile de construire soi-même un bon régulateur à liquide en se conformant au schéma ci-dessous (fig. 557).

A un récipient métallique B (1), on fixe, en l'y mastiquant, un tube métallique étroit, ou un tube de caoutchouc à vide, qu'on ajuste en outre à un tube en *tt* muni d'un tube latéral à robinet, et fermé en *m* par une membrane de caoutchouc. On remplit le tout de glycérine, sans laisser de bulles d'air; la présence du tube latéral *r* permet d'arriver à ce résultat assez rapidement. Cela fait, on introduit l'extrémité *m* du tube dans le tube en verre V, à travers le bouchon de caoutchouc qui ferme exactement; l'autre extrémité du tube V est munie aussi d'un bon bouchon de caoutchouc qui livre passage à deux tubes en verre servant, l'un, *a*, à l'arrivée, l'autre, S, à la

(1) On trouve dans le commerce des sphères creuses en cuivre qui se prêtent très bien à cet usage.

sortie du gaz qui va chauffer l'étuve à liquide ou à gaz dans laquelle est placé le récipient B qui contient le liquide dilatable. Pour obtenir une température donnée avec cet appareil, on allume le brûleur, on ouvre le

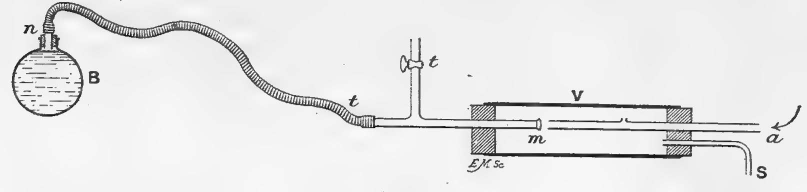


Fig. 557.

robinet *r* et on approche le tube *a* de la membrane de caoutchouc. Quand la température cherchée est atteinte, on ferme le robinet *r*. La dilatation de la glycérine contenue en *r* réglera, à partir de ce moment, l'accès du gaz dans le brûleur. Après quelques tâtonnements, on arrive à placer le tube *a* à la distance de *m* pour laquelle la flamme prend la hauteur nécessaire pour le maintien de la température au degré fixé. Un petit orifice, pratiqué dans le tube *a*, s'oppose à l'extinction complète.

c. RÉGULATEURS A CORPS DILATABLE GAZEUX

Le coefficient de la dilatation des gaz étant, comme on sait, de beaucoup supérieur à celui des solides et à celui des liquides, on obtiendra une sensibilité beaucoup plus grande en utilisant comme corps dilatable, soit un gaz, soit une vapeur.

Régulateur de Raulin. — Le corps dilatable est ici l'*air* enfermé dans le compartiment inférieur du récipient en verre (fig. 558) dont le fond contient une petite quantité de mercure. Le gaz arrive dans le compartiment supérieur par un tube taillé en biseau et en sort par un tube latéral qui le conduit au brûleur. Suivant la température de l'étuve dans laquelle l'appareil est fixé, l'air presse plus ou moins sur le mercure du compartiment inférieur et le fait monter plus ou moins haut, par le tube central, dans le compartiment supérieur. Là, suivant son niveau, ce mercure obture plus ou moins complètement l'orifice d'arrivée du gaz. Le tube à robinet qui relie le tube d'arrivée au tube de sortie du gaz (sauterelle) permet, lorsqu'il est légèrement ouvert, d'éviter l'extinction complète de la flamme, car la quantité de gaz qu'il débite est indépendante du régulateur et est toujours suffisante pour permettre au

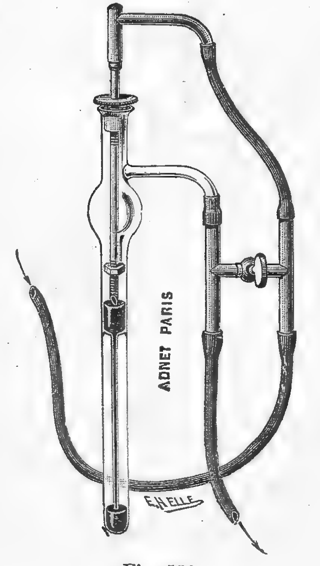


Fig. 558.

bec de gaz de brûler en veilleuse, même lorsque l'orifice en biseau est complètement fermé par le mercure. Le réglage se fait en amenant le tube d'arrivée au contact du mercure, lorsque le thermomètre indique la température voulue.

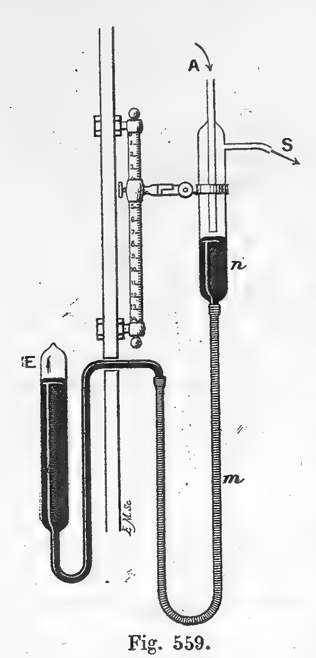


Fig. 559.

Régulateur Chauveau. — Le corps dilatable est ici *une vapeur* fournie par un liquide à point d'ébullition voisin de la température à laquelle on veut régler l'étuve. Le principe est très simple: soit une chambre en verre E, reliée à un tube manométrique et remplie de mercure (fig. 559). Si, dans cette chambre, on fait arriver une quantité d'éther suffisante pour la saturer à la température de l'étuve, la tension de cette vapeur prendra, pour cette température, une valeur fixe mesurée par la dénivellation du mercure produite dans le manomètre, et toute variation de température de l'étuve dans laquelle est placée la chambre E se traduira par une variation correspondante du niveau du mercure. Ce sont ces variations qui sont utilisées pour régler le débit du gaz qui se rend aux brûleurs.

Dans le régulateur CHAUVEAU, le gaz arrive par le tube A et sort en S pour se rendre au brûleur. Le réglage se fait en abaissant ou élevant le tube *mn*, jusqu'à ce que la température ne varie plus, c'est-à-dire jusqu'à ce que la dénivellation produite représente exactement la valeur de la tension de vapeur du liquide employé à la température fixe que l'on cherche.

Le liquide choisi diffère suivant cette température même :

Entre 25° et 40°	Éther.
35° et 45°	Hydrure d'amyle.
44° et 54°	Sulfure de carbone.
54° et 64°	Acétone.
58° et 70°	Chloroforme.
65° et 75°	Alcool méthylique.
75° et 85°	Alcool éthylique.
78° et 90°	Benzine.
90° et 110°	Benzine.

C'est un régulateur basé sur ce principe que TISSOT a employé, dans son étuve a lampe à pétrole, en lui adjoignant un dispositif mécanique très ingénieux faisant servir les mouvements du mercure dans le tube extérieur à actionner une sorte de couteau extincteur venant couper la flamme de la lampe ou se placer en dehors d'elle suivant que la température de l'étuve tend à s'élever ou à s'abaisser.

Régulateurs électro-magnétiques. — On peut utiliser la dilatation d'un corps solide, liquide ou gazeux, à produire, d'une façon *médiate*, la régula-

tion de la température, en l'employant à fermer le circuit électrique d'un électro-aimant muni d'une armature mobile.

Dans le modèle schématique représenté figure 560, l'armature mobile *a* vient comprimer, lorsque le circuit est fermé, le tube de caoutchouc par lequel le gaz arrive au brûleur, contre l'armature fixe *b*. Cette compression peut être réglée à l'aide du ressort *r* plus ou moins tendu.

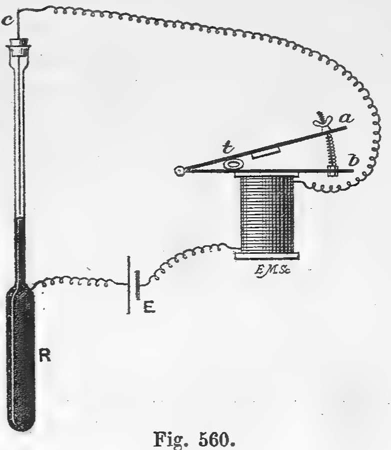


Fig. 560.

Le corps dilatable, — ici le mercure — étant placé dans l'étuve, on ouvre le robinet de gaz et on le laisse brûler jusqu'à ce que la température de l'enceinte soit arrivée aux environs du degré cherché.

A ce moment, on fait descendre le fil de platine *c* jusqu'à une très petite distance du niveau du mercure dans le récipient R. Si la température s'élève, le mercure, se dilatant, viendra fermer, à travers l'électro, le circuit de la pile E : l'électro, ainsi excité, attirera l'armature mobile qui, comprimant davantage le tube à gaz, fera baisser la flamme et par conséquent la température de l'étuve. Comme dans les autres modèles, l'extinction de la flamme ne sera jamais à redouter si on a pris soin d'adapter au tube à gaz, avant l'électro, une *sauterelle* permettant l'arrivée constante au brûleur d'une petite quantité de gaz.

La figure 561 représente un autre modèle de régulateur électro-magnétique

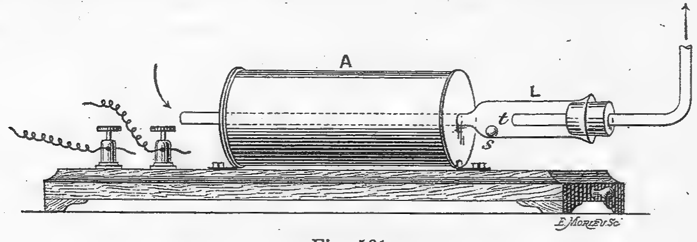


Fig. 561.

imaginé par A. Figuier : le gaz se rend au brûleur, suivant le sens indiqué par les flèches, après avoir traversé un tube cylindrique en verre placé au centre de l'électro-aimant A et terminé en L par une portion élargie dans laquelle est placée une bille en fer *s*.

Cette bille, que la présence du tube intérieur *t* suffit pour maintenir toujours dans le voisinage de l'extrémité polaire de l'électro-aimant, viendra par attraction fermer le tube d'arrivée du gaz quand le circuit sera fermé et le laissera libre au contraire, en revenant à sa position primitive, lorsque le circuit sera ouvert.

CHALEUR ANIMALE

Par M. F. LAULANIÉ

CHAPITRE PREMIER

DE LA PRODUCTION DE LA CHALEUR ENVISAGÉE COMME PHÉNOMÈNE UNIVERSEL CHEZ LES ÊTRES VIVANTS

Tous les êtres vivants produisent de la chaleur et cette production trouve son expression immédiate dans ce fait que la température propre des animaux et des végétaux excède, à des degrés variables, la température du milieu extérieur.

A cet égard, les animaux se partagent en deux grands groupes : chez les uns, la température propre se maintient à peu près invariable sous tous les climats, sous toutes les latitudes et en dépit des changements qui peuvent se produire, soit dans l'intensité de leur vie intérieure, soit dans les conditions externes qui pèsent constamment sur eux. Ce sont les animaux à sang chaud, bien mieux désignés par l'expression d'animaux à température constante ou *homœothermes* (Bergmann). Ce groupe embrasse les mammifères et les oiseaux.

Chez les animaux à sang froid (*hétérothermes*), la température propre est subordonnée aux fluctuations de la température extérieure et en subit toutes les variations. Mais elle lui est toujours ou presque toujours supérieure et, par là même, elle trahit la production de la chaleur.

La différence qui sépare les animaux à sang chaud et les animaux à sang froid a une extrême gravité et contient des conséquences physiologiques d'une très haute importance. Elle les place tout d'abord vis-à-vis du milieu extérieur dans des conditions tout à fait différentes. Les homœothermes ne peuvent maintenir la fixité de leur température que par une lutte incessante contre le froid et d'autant plus vive, que leur température propre dépasse davantage celle du dehors. Par cela seul qu'ils sont (en général) plus chauds que le milieu qui les entoure, les mammifères et les oiseaux rayonnent de la chaleur et subissent de ce chef, une déperdition incessante. Ils ne peuvent donc conserver leur température propre que par une production de chaleur suffisante pour compenser exactement les pertes dues au rayonnement.

En un mot, la fixité de la température chez les animaux à sang chaud ne peut être obtenue que par un acte de régulation automatique assurant l'égalité constante dans la production et la dépense de la chaleur. La calorification chez les homœothermes entraîne ainsi l'intervention d'une fonction nouvelle, la fonction régulatrice, en vertu de laquelle la production de la chaleur se mesure exactement sur la dépense variable due au rayonnement cutané et aux diverses formes de la déperdition. Réciproquement, lorsqu'en raison des changements qui s'introduisent dans la vie d'un animal, la production de la chaleur se modifie en un sens ou en l'autre, la déperdition subit une modification de même sens et de même valeur. On voit que la régulation de la température peut être définie une fonction faite pour assurer en permanence l'égalité de la production et de la dépense calorifiques et compenser les changements qui tendent à se produire dans l'un ou l'autre de ces termes.

En raison de ces diverses circonstances, les homœothermes fixent et tiennent en réserve une certaine quantité de chaleur qui est fonction de leur poids, de leur chaleur spécifique et de l'excès de leur température propre sur celle du milieu ambiant. En prenant pour mesure de la chaleur spécifique du corps des animaux le chiffre 0,83, tel qu'il résulte des calculs et des expériences de Rosenthal, on voit que, par une température de 10°, la réserve calorifique d'un homme de 70 kilogrammes $= 70 \times 27°,5 \times 0,83 = 1597$ calories. Celle d'un cheval de 500 kilogrammes atteindrait près de 12000 calories. Ces chiffres donnent une idée de la réserve moyenne de chaleur que les animaux à sang chaud doivent créer et entretenir en dehors de celle qu'ils contiendraient s'ils ne réglaient pas leur température.

Chez les animaux à sang froid, il n'y a pas ou presque pas d'emmagasinement calorifique. La presque totalité de la chaleur dont ils sont la source, se disperse au dehors, par rayonnement, au fur et à mesure de sa production. Aussi les hétérothermes s'échauffent-ils médiocrement et leur température propre diffère-t-elle très peu de celle du dehors. Les animaux de cette catégorie ne luttent pas contre le froid. La thermogenèse n'est pas dirigée ni réglée pour entretenir en eux une réserve calorifique et assurer la fixité de leur température. Aussi est-elle beaucoup moins intense que chez les animaux supérieurs.

La différence qui sépare, à cet égard, les homœothermes et les hétérothermes trouve une expression du plus haut intérêt au point de vue de la physiologie générale. Ses effets se rattachent à l'influence de la température ou de la chaleur considérées comme condition externe des manifestations de la vie. L'irritabilité des tissus et la puissance de leurs manifestations dépendent, en grande partie, de la température. Or, en vertu de la fonction régulatrice, celle-ci demeure invariable dans le milieu intérieur où vivent les éléments anatomiques des animaux à sang chaud et elle y atteint précisément le degré optimum le plus favorable à la manifestation des propriétés des tissus vivants. Elle sollicite donc et entretient en permanence, et d'une manière uniforme, l'irritabilité de ces tissus qui conservent toujours la même puissance d'action et la plus haute. Au contraire, chez les animaux

inférieurs, l'irritabilité des tissus vivants est assujettie à toutes les fluctuations de la température extérieure et les alternatives du chaud et du froid retentissent immédiatement sur elle, pour l'exalter ou l'amoindrir, selon les saisons. La continuité et l'intensité uniforme de la vie, tels sont donc, pour les animaux supérieurs, les caractères nouveaux qui découlent de la fixité et de la valeur optima de leur température.

Chez les hétérothermes, au contraire, la vie pauvre, en général, et médiocrement intense, est privée de cette uniformité et de cette continuité si précieuses à tant de titres pour les animaux qui y sont parvenus. Elle traverse nécessairement des phases de somnolence périodique ou d'engourdissement, au point qu'on la peut dire interrompue. Nous retrouverons ces faits en temps opportun.

Pour le moment, il convient de dégager une des indications les plus intéressantes que contiennent les manifestations si inégales de la thermogenèse chez les animaux à sang chaud et à sang froid.

La différence qui sépare ces deux grands groupes permet, en effet, de présumer la signification générale de la chaleur produite par les êtres vivants. Il suffit de constater que la fonction régulatrice, avec toutes les conséquences qu'elle entraîne, est un fait, sinon exceptionnel, au moins particulier, pour conclure à sa contingence. Visiblement, elle constitue un phénomène secondaire intervenant dans l'évolution des êtres comme un moyen, d'ailleurs considérable, de perfectionnement. Le fait essentiel et primitif, parce qu'il est universel, c'est la production de la chaleur. Et, étant donnée sa dispersion quasi immédiate chez les animaux à sang froid, on voit bien qu'elle n'est pas primitivement produite pour elle-même et en vue de son utilité. Tant que sa production n'est pas réglée, elle n'apporte aucun bénéfice aux animaux et apparaît exclusivement comme un simple résultat et non comme un but. Il y a donc deux choses dans la calorification : la production de la chaleur, phénomène universel, expression et conséquence inévitable des phénomènes chimiques de la vie, mais dépourvue en elle-même de toute finalité, et la régulation de la température faite pour apporter une condition intérieure favorable à l'activité des tissus vivants, et introduite secondairement dans l'évolution des êtres.

Il importerait maintenant de préciser la seule expression physique par laquelle se trahit la calorification chez les êtres vivants et de déterminer la valeur de leur température propre. Mais cette question est traitée dans une autre partie de cet ouvrage.

CHAPITRE II

RAISON GÉNÉRALE DE LA COMBUSTION EFFECTUÉE ET DE LA CHALEUR PRODUITE PAR LES TISSUS VIVANTS. — MATÉRIAUX DE LA COMBUSTION

Tous les animaux respirent, produisent de la chaleur et tous consomment de l'oxygène, et l'oxygène leur est indispensable. Quelle est la raison de ce double fait? Il est universel et nécessaire; mais l'universalité du phénomène

et sa nécessité n'en contiennent pas l'explication. Or, cette explication est indispensable en ce moment. Elle nous sera d'un grand secours dans l'interprétation et la critique des faits que nous avons à examiner.

C'est une loi générale que toute manifestation vitale, toute forme de l'activité est accompagnée d'une exagération dans l'intensité des combustions respiratoires et de la thermogenèse. On voit donc que le travail propre des tissus agissants est accompagné d'une dépense chimique et d'une production de chaleur. En un mot, les phénomènes de la vie se résolvent en un mouvement d'énergie où celle-ci revêt trois modes essentiels : travail propre des tissus, dépense d'énergie chimique et production d'énergie calorifique. Or ce sont là les trois termes principaux des transformations de l'énergie attachées aux diverses manifestations de l'activité. Toute action vitale est, en effet, une transformation dans laquelle les tissus agissants produisent le travail qui leur est propre, leur énergie spécifique et dépensent en même temps, et pàr corrélation, une forme *antérieure et disponible d'énergie.* C'est que les phénomènes de la vie sont régis comme ceux du monde inerte par la loi souveraine de la conservation de l'énergie ou de l'équivalence des forces. Vivre c'est agir, c'est-à-dire produire un travail quelconque, et les tissus ne peuvent engendrer ce travail de toutes pièces, ils ne peuvent produire leur énergie spécifique (contraction musculaire, sécrétion, vibration nerveuse, etc.) qu'au prix d'une dépense équivalente d'énergie antérieure qui en est la rançon. Cette énergie antérieure et disponible a nécessairement une source extérieure. Pas plus que les machines ordinaires, la machine vivante n'est capable de création. Elle ne saurait engendrer l'énergie qu'elle manifeste ; elle se borne à exploiter et à transformer une énergie préexistante qu'elle emprunte au dehors et qu'elle trouve sous sa forme potentielle et disponible dans les principes immédiats de l'alimentation. Elle est donc traversée par un courant d'énergie qui commence en dehors d'elle et que nous allons voir se répandre en dehors d'elle. Les aliments forment ainsi avec l'oxygène de l'air la source originelle de l'énergie mise en œuvre par les animaux. Le premier terme de l'énergétique biologique est pour le moment suffisamment défini.

Quant au travail propre, à l'énergie spécifique des tissus agissants, elle est représentée par ce travail intérieur et invisible, dans lequel les éléments anatomiques transforment le potentiel alimentaire pour en tirer des effets utiles. Mais il est précisément nécessaire d'envisager le travail intérieur, cette énergie vivante, en dehors de ses manifestations utiles. L'idée de cette abstraction si heureuse et si féconde appartient à M. Chauveau, qui sous le nom de travail physiologique, a considéré en elle-même et en dehors de ses utilités immédiates l'énergie propre des tissus (*Le travail physiologique et son équivalence*, in *Revue scientifique*, 1888). Le travail physiologique est le terme fondamental du cycle des transformations de l'énergie dans l'organisme, et il faut montrer qu'il se distrait aisément de ce qui, n'est pas lui. C'est le travail intérieur des muscles dans la contraction, c'est l'effort silencieux et invisible de l'épithélium sécréteur, de la plante qui végète et qui pousse ses organes nouveaux ; c'est la vibration intérieure des nerfs transmettant une excitation. Or il n'y a aucune analogie entre le travail intérieur

de la contraction et le travail mécanique qu'elle engendre, entre l'épanouissement d'une fleur et la force cachée qui le dirige, entre la vibration nerveuse et l'explosion sensitive ou musculaire qu'elle provoque. Le travail physiologique, dont l'attention est aisément distraite par la considération des effets utiles toujours extérieurs et souvent très bruyants, apparaît ainsi dans toute sa réalité et son autonomie.

L'exemple le plus démonstratif qu'on en puisse présenter est celui d'un muscle contracté et soutenant une charge à hauteur fixe. Dans ce cas, il n'y a pas d'effet utile et le travail physiologique du muscle apparaît dans toute sa pureté et sans autre expression sensible que la force qui reste immanente dans l'organe pendant toute la durée de sa contraction. Or le muscle ne peut entretenir cette force qu'au prix d'une dépense parallèle et contemporaine d'énergie chimique empruntée aux aliments.

Mais le travail physiologique du muscle contracté n'est qu'une forme transitoire de l'énergie qu'il met en œuvre. Il n'est point et ne peut être le dernier terme du cycle, car il ne reste rien de lui à la fin de la contraction. Or, il faut que l'énergie qu'il représente se retrouve ailleurs sous une autre forme, ou bien nous serions mis en présence d'une dépense sans restitution, c'est-à-dire d'un anéantissement d'énergie. L'énergie chimique dépensée dans la contraction doit donc se retrouver à la fin du cycle, sous une forme sensible et cette fois impérissable. Elle se retrouve, en effet, dans la chaleur qui se dégage pendant toute la durée de la contraction, formant ainsi le troisième et dernier terme du cycle. Envisagé dans son expression la plus simple, le mouvement de l'énergie inhérent à l'activité des tissus comporte donc trois termes équivalents liés dans l'équation unisériale suivante :

$$\text{Énergie chimique} = \text{travail physiologique} = \text{chaleur.}$$

Nous adoptons ici l'hypothèse proposée par M. Chauveau dans les diverses publications où il a développé les vues que nous résumons. Cette hypothèse consiste à admettre que le travail physiologique fixe temporairement et d'emblée la totalité du potentiel chimique et le restitue intégralement en chaleur. Mais, au point de vue qui nous sollicite dans cette étude, nous pouvons accepter, sans menacer les conclusions qui vont suivre, l'hypothèse thermodynamique selon laquelle le travail physiologique s'alimente immédiatement non pas dans les combustions qui libèrent l'énergie potentielle, mais dans la chaleur issue de ces combustions.

Dans ce cas, l'équation devient :

$$\text{Énergie chimique} = \text{chaleur} = \left\{\begin{array}{l}\text{travail physiol.}\\ + \text{chaleur dissipée}\end{array}\right\} = \text{chaleur.}$$

Dans les deux hypothèses, la chaleur finale a toujours le même caractère et la même signification. Elle exprime la restitution nécessaire de l'énergie chimique dépensée dans l'activité vitale, et c'est là précisément le fait fondamental qu'il convient de mettre en relief, parce qu'il contient la signification véritable de la chaleur animale. La production de la chaleur attachée aux

actes de la vie est un résultat nécessaire et fatal. Elle n'est point primitivement préparée et obtenue comme un but. Sa raison d'être n'est pas en elle, mais bien dans les nécessités d'un principe inéluctable de mécanique générale. La fonction régulatrice est intervenue secondairement chez les animaux supérieurs et, dès ce moment, la chaleur est préparée pour elle-même, pour son utilité et pour l'heureuse influence qu'elle exerce comme condition physique, dans le milieu intérieur. Dès ce moment, la fonction apparaît, mais il faut y voir un phénomène d'adaptation, un simple épisode de l'évolution greffé sur un principe de mécanique générale. La chaleur ne cesse pas pour cela de rester attachée à ses nécessités d'origine, elle est toujours le dernier terme des transformations de l'énergie mise en œuvre dans le travail physiologique des tissus. Elle est toujours la restitution d'une dépense d'énergie chimique et il n'y a pas de dépense vaine dans l'organisme. Toute dépense d'énergie chimique est employée à entretenir le travail physiologique des tissus vivants et la chaleur qui la restitue est toujours précédée d'un terme purement physiologique : le travail propre de ces tissus.

Dès lors ce mode de vivre qui est le repos peut être l'immobilité, mais ce n'est point l'inaction. Sous l'inertie apparente de l'animal immobilisé dans le repos le plus complet, se cache le travail invisible de ses tissus qui restent toujours agissants, puisqu'ils respirent et qu'ils produisent de la chaleur, puisqu'en un mot ils transforment de l'énergie. Le repos n'est qu'un mode discret de l'activité. C'est l'activité des organes ou des tissus qui ne font rien et qui se bornent à vivre.

Mais il faut envisager les faits authentiques où, très évidemment, les tissus respirent et produisent la chaleur, en dehors de toute manifestation de leurs propriétés physiologiques et de toute activité sensible. Tel est le cas des tissus vivants mais séparés du corps et continuant à respirer ; tels sont aussi les faits où, survivant à l'organisme, les tissus d'un cadavre apportent le témoignage non équivoque d'une production de chaleur après la mort. Il n'est point douteux, et nous en trouverons bientôt la preuve, que pendant la vie normale la calorification dirigée par le système nerveux ne trouve des ressources particulières dans des manifestations de cet ordre. Or, même dans ce cas, nous admettons un intermédiaire physiologique, nous admettons de la part des tissus une intervention nécessaire, un effort particulier qui n'est certainement pas du travail physiologique, mais qui reste un mode du travail et de l'énergie. Si on considère l'instabilité de la matière vivante et comment elle est renouvelée par un mouvement incessant de dissolution et de rénovation, on ne peut se défendre de voir dans ce mouvement l'expression d'un effort silencieux et d'un travail réel. C'est, sans doute, ce travail appelé par M. Chauveau le travail commun (*La vie et l'énergie*) qui reste l'agent permanent et secondaire de la calorification et contribue, avec le travail physiologique, à la production de la chaleur animale.

CHAPITRE III

SOURCES DE LA CHALEUR ANIMALE

Pour résoudre cette question, nous pouvons provisoirement laisser de côté les termes intermédiaires du cycle des transformations de l'énergie dans l'organisme, et retenir seulement les termes extrêmes : c'est-à-dire la dépense chimique alimentaire et l'excrétion thermique qui en est l'équivalent et la restitution intégrale. A ce point de vue, la chaleur animale procède des métamorphoses chimiques imposées aux aliments et, sous une forme plus explicite, de cet ensemble de faits qui constituent la nutrition.

Or la nutrition dépend elle-même de deux grands actes permanents et nécessaires, affectant le caractère de fonctions primordiales de la substance organisée. Ces deux grands actes sont la rénovation de la matière vivante et la production du travail physiologique. Ils dominent et commandent toutes les métamorphoses chimiques des aliments. Aussi est-il nécessaire de les considérer pour présumer de la matière et du sens de ces métamorphoses.

Rénovation de la matière vivante. — La matière vivante est éminemment instable, en sorte qu'elle est le siège d'un mouvement de désorganisation qui l'entraîne d'une manière incessante et continue. A tous les moments, une partie de l'albumine vivante, du protoplasma actif, cesse de vivre et passe à l'état d'albumine morte pour se résoudre finalement en CO^2, en H^2O et en un certain nombre de termes azotés voisins de l'état de minéral, dont le principal est l'urée. On sait aujourd'hui, et nous sortirions de notre sujet en insistant sur ce point, que l'urée se produit surtout dans le foie en même temps, sans doute, que les autres formes de la désintégration de l'albumine. Quoi qu'il en soit, l'excrétion azotée devient chez l'animal à jeun l'expression et la mesure de cette désintégration. Mais la nécessité du phénomène n'apparaît pas encore. Elle ne devient visible qu'au moment où on voit l'excrétion azotée conserver toute son importance chez les animaux exclusivement nourris avec de la graisse ou des hydrates de carbone. Dès ce moment, il est impossible de soutenir que la désassimilation de l'albumine vivante, l'histolyse, est un artifice provisoire destiné à procurer à l'organisme d'un animal à jeun les aliments qui lui manquent et qui sont nécessaires à son activité. La destruction de la matière vivante apparaît ainsi comme une fonction primordiale nécessaire et incoercible. Le protoplasma vivant passe sa vie à mourir et c'est dans ce sens que Cl. Bernard a pu dire : « La vie c'est la mort ». Mais, chez les animaux convenablement alimentés, ce mouvement de dissolution est compensé par un mouvement inverse de restauration dans lequel la matière vivante répare ses pertes aux dépens de l'albumine alimentaire qui s'organise, s'assimile à la matière vivante et se vivifie dans une sorte de création. Aussi Cl. Bernard a-t-il pu compléter l'expression de son antithèse en disant que la vie est une création.

Ainsi apparaît une des fonctions de l'albumine alimentaire, qui est de se substituer à l'albumine morte, dans la substance des éléments anatomiques.

Mais ces notions resteraient incomplètes si on ne tenait compte de ce fait empirique : La quantité d'albumine alimentaire nécessaire pour réparer les pertes dues à l'excrétion azotée est supérieure à la quantité d'albumine représentée par cette excrétion à l'état de jeûne (Voit). Ce n'est qu'à ce prix que l'animal conserve son poids et se maintient en équilibre d'azote.

Cette relation pondérale, inexplicable au premier abord, paraît trouver sa raison dans les destinées multiples de l'albumine alimentaire. Dès que celle-ci est parvenue dans la circulation, elle se distribue dans tous les tissus et dans tous les organes, parmi lesquels le foie placé immédiatement sur son passage. Elle obéit donc à une double direction : elle devient en partie la proie des tissus qui y puisent la matière de leur restauration et en partie la proie de la glande hépatique qui la fait passer à l'état d'urée. Le foie ne discerne pas l'albumine alimentaire de l'albumine morte qui vient d'abandonner les tissus sous une forme plus ou moins élevée ou plus ou moins simple. Il agit fatalement sur toutes les formes de l'albumine qui lui sont apportées par la circulation, en sorte qu'une partie de l'albumine alimentaire est détournée de sa destination première et enlevée à l'œuvre de l'assimilation. Les tissus n'ont ainsi que le bénéfice de l'excédent d'albumine alimentaire qui échappe provisoirement à l'action transformatrice du foie et qui ne subira cette action qu'après avoir parcouru une phase d'assimilation et d'organisation. Mais, de toutes manières, la totalité de l'albumine alimentaire traverse directement ou indirectement le foie pour y subir les métamorphoses régressives qui la font passer à l'état d'urée. Or, la phase hépatique de l'évolution de l'albumine, et c'est là que nous voulions en venir, a le plus haut intérêt pour l'organisme. Parmi les termes intermédiaires de cette transformation figurent la graisse et le glycose dont nous allons voir le rôle alimentaire fondamental dans le deuxième acte de la nutrition : la production des énergies vivantes ou du travail physiologique.

Du glycose considéré comme aliment immédiat du travail physiologique, rôle des divers principes immédiats. — L'activité des tissus entraîne, nous l'avons vu, une dépense d'énergie chimique qui est la rançon de l'énergie nouvelle produite par les tissus agissants. Quel est le rôle des divers principes immédiats dans cette dépense ? Les nombreux documents acquis de ce côté, et notamment les recherches de M. Chauveau, permettent de donner à cette question une solution parfaitement claire et probablement définitive.

Ces documents sont relatifs aux sources chimiques du travail musculaire. Mais les conclusions acquises pour les muscles s'étendent évidemment à tous les tissus et à tous les modes de l'activité. Nous les résumerons sommairement ici, renvoyant, pour les détails, à notre livre sur *l'Énergétique musculaire.*

L'activité des muscles est accompagnée d'un accroissement considérable dans les combustions respiratoires. Cet accroissement se manifeste doublement : 1° dans les échanges gazeux de la respiration ; 2° dans la respiration élémentaire des muscles, et ici nous possédons les précieux résultats obtenus par M. Chauveau avec la collaboration de M. Kaufmann sur le muscle rele-

veur de la lèvre supérieure du cheval. En somme, l'ensemble des faits accumulés sur ce point permet de conclure : Le potentiel chimique dépensé dans la production du travail physiologique des muscles fournit, par sa combustion et très rapidement, une grande quantité d'acide carbonique ; il est donc très aisément combustible. En ce qui touche la nature du potentiel dépensé dans le travail et livré aux combustions qui l'entretiennent, elle découle de lois déterminées par l'expérimentation la plus rigoureuse et enfermées dans les propositions suivantes :

Relativement aux substances albuminoïdes. — L'intensité de l'excrétion azotée n'est pas influencée directement par le travail musculaire. La production du travail ne réclame donc en elle-même aucune dépense nouvelle et spéciale d'albumine.

Relativement aux hydrates de carbone. — Le glycose est l'aliment immédiat et exclusif des combustions intramusculaires et de la force qu'elles engendrent.

Relativement aux graisses. — Les réserves adipeuses de l'organisme fournissent la matière du renouvellement du potentiel glycose dépensé pendant le travail.

Rôle des albuminoïdes. — L'invariabilité de l'excrétion azotée pendant le travail a été établie par les expériences de Fick et Wislicenus, de Pettenkoffer et Voit, de Voit, de Wolff, de Kellner, de Chauveau et Contejean. Dans le cas de travail excessif ou d'alimentation insuffisante, on constate, il est vrai, un excès d'excrétion azotée et la production du travail paraît emprunter aux albuminoïdes déjà assimilés et organisés une part de l'énergie mise en œuvre, mais cette part est extrêmement faible et ne représente qu'une minime partie de l'excès du travail produit. Il reste un excédent de travail énorme dont on ne peut retrouver l'équivalent chimique, ni dans la ration de l'animal, ni dans l'albumine arrachée à ses tissus (expériences de Kellner à la ferme expérimentale d'Hoheinheim). Ce fait est tellement considérable qu'il convient de le préciser : un cheval effectuant un travail de 808 000 kilogrammètres par jour, reste en équilibre de poids et d'azote avec une excrétion quotidienne de $198^{gr},6$ d'azote. Sa ration est donc juste suffisante. Dans une deuxième période de même durée (huit à quinze jours), on le soumet à un travail quotidien de 2 424 000 kilogrammètres. L'animal perd de son poids et son excrétion azotée s'élève à un maximum de $234^{gr},3$, soit un excédent de $35^{gr},7$ d'azote, en regard d'un excès de travail atteignant 1 616 000 kilogrammètres. La disproportion est énorme et il est intéressant de l'évaluer.

L'azote excrété en excès, et c'est un maximum, représente $35,7 \times 6,25 = 223,3$ d'albumine sèche contenant et pouvant livrer une énergie potentielle égale à $903^{cal},600$, soit 384 030 kilogrammètres. Or l'excès de travail effectué est de 1 616 000 kilogrammètres. Il en reste donc plus des trois quarts (1 232 000) qui ont trouvé leur source ailleurs que dans la ration de l'animal et dans son albumine vivante. Nous aurons à déterminer cette source, mais, pour le moment, une première conclusion s'impose : l'excès d'excrétion azotée attaché au travail excessif ne contient aucune finalité

alimentaire; il prouve seulement que le travail excessif constitue une condition antiphysiologique de nature à précipiter le mouvement de dissolution et de désorganisation qui entraîne la matière vivante.

Rôle des hydrates de carbone; glycose et glycogénie. — Notre proposition sur le rôle du glycose apparaît déjà très vraisemblable en raison de ce double fait, que le potentiel employé dans le travail dégage en brûlant de très grandes quantités de CO^2 et que ce potentiel n'est pas de nature albuminoïde. Elle repose en outre sur un certain nombre de documents qu'il convient de passer sommairement en revue :

1° Le quotient respiratoire $\left(\frac{CO^2}{O}\right)$ s'élève toujours pendant le travail; il incline vers l'unité et tend à prendre la valeur théorique du quotient respiratoire du sucre. Ce fait, constaté par un grand nombre d'expérimentateurs, n'a reçu sa véritable interprétation qu'à la suite des recherches entreprises par M. Chauveau et auxquelles il a bien voulu nous associer.

2° Le glycose dépensé dans l'intimité des muscles pendant le travail rend compte des combustions intramusculaires attachées à ce travail. Cette balance exacte ressort des travaux entrepris par M. Chauveau avec la collaboration de M. Kaufmann, et les résultats obtenus par ces expérimentateurs, sur le releveur de la lèvre supérieure du cheval, ont ici une signification nouvelle et particulièrement précieuse. C'est pourquoi nous résumons dans les tableaux qui vont suivre les expériences de M. Chauveau.

Bilan des combustions intramusculaires et du glycose dépensé dans le travail spontané du releveur de la lèvre supérieure du cheval.

		Repos.	Travail.	Accroissement.
Quantités par kilogramme de muscle et par heure (coefficients).	Irrigation sanguine......	$12^{lit},229$	$56^{lit},321$	1 à 4,6
	Oxygène consommé.....	$0^{lit},307$	$6^{lit},207$	1 à 20,1
	Acide carbonique produit.	$0^{lit},221$	$7^{lit},835$	1 à 35,45
	Sucre prélevé...........	$2^{gr},042$	$8^{gr},439$	1 à 4,13

A ne tenir compte que des chiffres bruts, on ne trouve pas dans ce tableau la relation prévue entre le sucre disparu et l'acide carbonique produit, mais on y découvre une indication très curieuse. Pendant le repos, le sucre prélevé par le muscle excède manifestement les besoins de sa combustion, et pendant le travail le phénomène se renverse, le sucre disparu ne suffit pas entièrement à alimenter les combustions. Pour donner toute sa précision à ce grave détail, supposons provisoirement que le CO^2 dérive en effet de la combustion du glycose, et évaluons la quantité de sucre brûlé, en partant de la quantité d'acide carbonique produit. Cette évaluation repose sur ce fait que 1 litre de CO^2 répond à $1^{gr},35$ de glycose. La comparaison sur ces nouvelles bases est exposée dans le tableau suivant :

		Repos.	Travail.
Quantités par kilogramme de muscle et par heure.	Sucre prélevé par le muscle releveur (P)............	2gr,042	8gr,436
	Sucre brûlé (B) et dépensé.	0gr,300	10gr,65
	$\frac{P}{B}$......................	6,80	0,792
	P — B....................	+1gr,742 (réservé).	— 2gr,214 (déficit).

Si nous admettons les données contenues dans ce tableau, nous voyons que la dépense du glycose n'aurait pas sa mesure ni son expression dans le sucre abandonné au muscle par le sang artériel et qu'il faudrait distinguer soigneusement la fixation et la dépense de ce principe immédiat. Pendant le repos, la fixation l'emporterait sur la dépense et le glycose s'accumulerait dans le muscle et s'y mettrait en réserve. Pendant le travail, au contraire, la dépense excéderait la fixation de 1/5 à peu près et les combustions ne trouveraient leur aliment complet qu'en prélevant le supplément qui leur manque dans les réserves du repos.

Moyennant cette hypothèse de l'accumulation du potentiel pendant le repos, le sucre dépensé par le muscle pendant le travail rend exactement compte des combustions attachées au travail de ce muscle. Or, cette fiction provisoire est, comme nous allons le voir, une réalité solidement établie par de nombreuses déterminations, et notre conclusion provisoire sur le rôle du glycose devient définitive et légitime.

Le glycose est, en effet, tellement indispensable à la production de la force musculaire que sa présence dans les muscles à l'état de *glycogène* est constamment assurée par l'accomplissement de deux grandes fonctions, la glycogénie musculaire et la glycogénie hépatique, celle-ci trouvant sa finalité et ses motifs dans la première.

De la glycogénie musculaire. — Le glycose est mis en réserve par les muscles sous la forme de *glycogène* (Sanson, Cl. Bernard, Nasse).

La proportion de glycogène augmente dans les muscles pendant le repos et diminue pendant l'activité (Cl. Bernard, Weiss, Chauveau, Marcuse, Krauss, Moritz, Werther, Kulz).

Dans l'appareil musculaire de certaines espèces animales, le glycogène prédomine dans les muscles peu actifs, comme ceux de l'aile dans le poulet, et des membres postérieurs dans la chauve-souris (Grothe).

Dans les muscles anémiés par la ligature de leurs vaisseaux, le glycogène se dépense sans pouvoir se renouveler, puisqu'on a tari la source de glycose qui l'alimente, et il finit par disparaître complètement (Chandelon).

Réciproquement : dans les muscles placés dans l'état d'inertie par la section de leurs nerfs moteurs, mais dont la circulation est intacte, la dépense est nulle, tandis que le renouvellement ne trouve aucun obstacle, et le glycogène s'accumule (Chandelon). En résumé, le glycogène s'épuise dans les muscles actifs, mais séparés de la circulation et privés d'aliments, tandis qu'il s'accumule dans les muscles inertes, mais alimentés.

En réalisant simultanément l'anémie et la paralysie des muscles, on supprimerait à la fois la dépense et le renouvellement du glycogène, et le taux de ce principe demeurerait invariable. C'est ce qu'ont fait Morat et Dufourt qui, utilisant cette circonstance, ont introduit dans la question de nouveaux résultats que les limites où nous devons rester nous empêchent malheureusement d'analyser. Disons seulement que les muscles épuisés de leur glycogène par la ligature de leurs vaisseaux et par une longue série d'excitations électriques, sont très avides de glycose. Dès que la circulation les pénètre de nouveau, le glycose cédé par le sang artériel à ces muscles affamés atteint des proportions exceptionnelles, supérieures même à celles que l'on observe pendant le travail de leur contraction (Morat et Dufourt).

Les muscles ont donc la faculté d'accumuler et d'entretenir en eux une réserve toujours disponible de potentiel sous forme de glycogène. Il y a là une véritable fonction, la glycogénie musculaire, qui règle et assure l'alimentation du moteur d'une manière plus prochaine et plus immédiate.

Le phénomène de la glycogénie musculaire avec les inégalités qu'il apporte dans la fixation du glycose prélevé par les muscles sur le sang artériel, concorde merveilleusement avec les résultats des analyses de M. Chauveau sur le releveur de la lèvre supérieure. Ces résultats ont une direction si précise, qu'à défaut des expériences que nous venons de raconter, ils suffiraient à dénoncer ou à faire prévoir la réalité de la glycogénie musculaire.

C'est par là que le bilan des combustions intramusculaires et du glycose dépensé pendant le travail devient un document fondamental. C'est là qu'il trouve à la fois toute sa signification et toute sa puissance démonstrative.

Intervention de la glycogénie hépatique pendant le travail. — Le mouvement qui entretient et renouvelle le glycogène dans les muscles réclame nécessairement un mouvement corrélatif et parallèle dans la fonction glycogénique du foie. En fait, la production du sucre dans le foie s'exagère toujours pendant et après le travail (Chauveau). La consommation périphérique du glycose appelle toujours une production compensatrice et les deux actes sont liés par une telle solidarité que les organes consommateurs sont invariablement préservés de la disette. Dès lors, selon la remarque de M. Chauveau, le foie est très rigoureusement et très exactement le collaborateur des muscles, et on comprendra toute l'importance de cette collaboration si on réfléchit que l'appareil musculaire d'un moteur animé, comme le cheval, consomme au moins 3 ou 4 kilogrammes de glycogène dans les vingt-quatre heures.

Rôle des graisses. Graisses de l'organisme considérées comme réserves de potentiel. — Parmi les faits exposés dans ce qui précède, il en est un qu'il convient de rappeler parce qu'il va nous permettre de préciser une des attributions essentielles des graisses de l'organisme. Ce fait est relatif au bilan nutritif du cheval qui, dans les expériences de Kellner, avait reçu une alimentation inférieure au travail qu'on exigeait de lui. Nous avons vu que ce bilan fait ressortir un excédent de 1 200 000 kilogrammètres dont l'équivalent chimique ne se trouve ni dans l'alimentation de l'animal, ni dans l'excès de l'albumine arrachée à ses tissus par le mouvement exceptionnel de désintégration attaché au travail excessif. Le potentiel destiné à couvrir

ces 1 200 000 kilogrammètres a donc été nécessairement emprunté aux graisses de l'organisme. Assurément, l'aliment immédiat du travail reste toujours le glycose. C'est désormais une loi de physiologie générale qu'il faut tenir pour indiscutable, qu'au moment où les muscles travaillent ils consomment du sucre (à l'état de glycogène) et ne consomment que du sucre. Il faut en inférer que, dans le cas d'alimentation insuffisante, les graisses de l'organisme livrent aux muscles, chargés par là même d'un excès de travail, le potentiel glycose nécessaire à la production de ce travail supplémentaire. Nous sommes ainsi conduits à considérer les graisses de l'organisme comme un vaste réservoir d'énergie, un véritable accumulateur prêt à livrer le potentiel glycose réclamé par les exigences de l'activité musculaire.

Bien plus, les graisses interviennent dans la vie accoutumée, même chez les animaux soumis au régime hydrocarboné, et contribuent au renouvellement du glycose au fur et à mesure de l'utilisation des réserves alimentaires contenues dans le dernier repas. Mais pour rendre tout cela sensible et en trouver l'expression extérieure, il est nécessaire d'étudier le procédé chimique qui préside à la transformation de la graisse en glycose. La théorie de l'oxydation imparfaite proposée par M. Chauveau s'accorde aisément avec tous les faits observés et nous n'hésiterons pas à l'adopter. L'opération s'exprime par l'équation suivante :

$$\underset{\text{Stéarine.}}{2\,(C^{57}H^{110}O^{6})} + 67\,O^{2} = \underset{\text{Glycose.}}{16\,(C^{6}H^{12}O^{6})} + 18\,CO^{2} + 14\,H^{2}O.$$

On voit, et c'est là le point qu'il convient de mettre en relief, que la glycogénie adipeuse réclame un excédent considérable d'oxygène par rapport au dégagement de CO^2. Dans l'équation ci-dessus, le quotient respiratoire prend une valeur extrêmement faible : $\frac{CO^2}{O^2} = \frac{18\,CO^2}{67\,O^2} = 0{,}268$. Toute intervention de la graisse dans la production du glycose, par oxydation incomplète, doit donc se traduire par un abaissement du quotient respiratoire et nous disposons ainsi d'un témoin extérieur extrêmement précieux. Ces présomptions, que M. Chauveau avait inférées de ses vues générales sur la nutrition, ont été heureusement confirmées par l'expérience. Toute dépense de potentiel glycose, comme celle qui accompagne le travail, appelle un renouvellement qui se trahit au dehors par l'abaissement du quotient respiratoire. Le phénomène n'a jamais manqué ni dans les expériences de M. Chauveau ni dans celles que nous avons entreprises avec lui dans notre laboratoire. Constamment, le repos consécutif au travail musculaire est caractérisé par l'abaissement du quotient respiratoire qui tombe au-dessous de sa valeur initiale et normale. Il n'y a d'exception que chez les animaux (chiens) saturés à l'avance de potentiel par un repas abondant de soupe au lait. Mais cette expression de la glycogénie adipeuse se retrouve ailleurs. C'est dans ce sens qu'il faut interpréter l'abaissement progressif du quotient respiratoire à partir du repas chez les animaux herbivores ; la désassimilation de l'albumine a évidemment sa part dans ce phénomène. Mais il est évident que l'oxydation imparfaite des graisses apporte ici une influence considérable et dont les manifes-

tations atteignent leur maximum, dès les premières périodes de l'inanition, et à l'instant où les réserves alimentaires sont épuisées.

Le quotient respiratoire constitue ainsi l'expression extérieure et sensible de l'évolution du potentiel glycose, sa dépense certaine pendant le travail et son renouvellement non moins certain pendant le repos consécutif. Enfin le même témoignage dénonce l'élaboration progressive du glycose aux dépens des graisses au fur et à mesure de l'épuisement des réserves alimentaires.

Nous trouvons d'ailleurs sur ce point un document précieux dans la physiologie des animaux hibernants. La nutrition de ces animaux pendant le sommeil hibernal est dominée par un fait prépondérant : l'accumulation du glycogène dans le foie, c'est-à-dire la préparation des réserves de potentiel nécessaires à l'activité du réveil. Or le phénomène se trahit avec d'autant plus de clarté que l'opération antagoniste, la dépense du glycose, est extrêmement faible. Il trouve alors une expression vraiment saisissante et inattendue dans la chute énorme du quotient respiratoire, que Regnault et Reiset, dans leurs mémorables recherches sur la respiration, ont vu tomber à 0,399 chez la marmotte. La respiration des hibernants emprunte donc un excès considérable d'oxygène et cet étrange phénomène était resté sans explication, jusqu'au moment où M. Chauveau l'a justement interprété en le rattachant à la glycogénie par oxydation incomplète des graisses de l'organisme.

La fonction glycogénétique des graisses vient ainsi donner un relief nouveau à l'importance du glycose envisagé comme l'aliment de l'activité, et on pourrait considérer comme achevée la théorie du potentiel alimentaire de l'énergie vivante. Mais il ne faut négliger aucun document, et le moment est venu de constater la large prédominance des hydrates de carbone dans l'alimentation des moteurs animés. Il résulte des renseignements qu'il est facile, aujourd'hui, d'obtenir, sur l'alimentation des chevaux dans les industries voiturières, que la ration de ces animaux admet une proportion de principes ternaires six et jusqu'à huit fois plus considérable que celle des matières albuminoïdes. La théorie physiologique trouve ainsi sa légitime consécration dans la pratique, d'ailleurs fort éclairée, des industriels.

Mais les attributions précises que nous avons assignées aux principes immédiats dans l'alimentation de la force musculaire et l'étroite spécialisation du rôle qui leur incombe de ce côté ne semblent pas s'accorder avec ce fait notoire et vulgaire : la diversité du régime alimentaire chez les différentes espèces animales. Tous les animaux sont des moteurs, quelle que soit la nature de leur alimentation naturelle, et on doit en inférer très justement que tous les principes immédiats peuvent alimenter l'activité musculaire. Le régime est indifférent, mais si cette indifférence n'exclut aucune théorie sur l'origine de la force, elle n'en justifie aucune. La vérité est que la considération du régime alimentaire n'a aucune valeur scientifique. Le problème de l'alimentation du muscle ne relève pas de l'histoire naturelle, mais bien de la physiologie générale et de l'analyse expérimentale. Le régime est un fait grossier contingent et relatif à des circonstances purement anatomiques qui ne touchent en aucune manière aux procédés intimes de la nutrition et ce sont ces procédés qu'il faut considérer. Or les faits de la physiologie géné-

rale qui viennent de les mettre en relief, nous expliquent précisément la parfaite indifférence du régime alimentaire dans la genèse de la force musculaire. Tous les principes immédiats sont capables d'alimenter le travail physiologique des muscles, parce qu'ils sont tous capables de livrer du glycose aux opérations transformatrices du foie. La glycogénie hépatique a précisément pour effet de neutraliser toutes les inégalités de l'alimentation intestinale et d'assurer l'uniformité et la permanence de l'alimentation musculaire. Grâce à cet intermédiaire, tous les principes immédiats peuvent s'équivaloir et se substituer les uns aux autres pour l'alimentation des moteurs animés. Telles sont au moins les conséquences de la théorie, et précisément elles ont trouvé tout récemment leur consécration expérimentale dans trois séries de recherches entreprises par M. Chauveau. Les résultats obtenus prouvent que la puissance trophique des principes immédiats dépend de la quantité de glycose qu'ils peuvent livrer aux opérations extractives du foie. De là la notion des *poids isoglycosiques*. On entend par là les quantités de principes immédiats fournissant le même poids de glycose. Or il résulte des expériences précitées que sur un chien de 16 à 17 kilogrammes, soumis au travail, et recevant une ration fondamentale de 400 à 500 grammes de viande, les divers principes immédiats ajoutés à cette ration produisent les mêmes effets nutritifs quand on les substitue les uns aux autres dans la proportion indiquée par les poids isoglycosiques.

Jusqu'ici on s'était rattaché, et beaucoup demeurent encore fidèles, à la théorie des *poids isodynamiques* soutenue par Rubner et par l'École allemande. Les poids isodynamiques sont les quantités de principes immédiats qui, par leur combustion, produisent la même quantité de chaleur. Dans la conception de Rubner, les principes immédiats produiraient les mêmes effets trophiques lorsqu'on les substitue les uns aux autres proportionnellement aux poids isodynamiques. Les expériences de M. Chauveau infirment cette manière de voir.

Nous serions ainsi entraînés à rechercher, dès à présent, les procédés chimiques de la glycogénie, ce qui nous permettrait de déterminer la valeur des poids isoglycosiques pour les trois groupes de principes immédiats. Mais les équations qui interviennent seront plus utilement examinées à propos de la discussion que soulèvera plus bas la théorie de la combustion. Pour le moment il nous suffit de retenir l'ensemble des faits qui viennent d'être exposés touchant les métamorphoses attachées au mouvement nutritif et qui permettent d'assigner leurs véritables fonctions aux principes immédiats ; on a vu le rôle capital du glycose dans la production de l'énergie musculaire, et cette fonction doit être envisagée dans toute son étendue et dans toute son importance. *A priori* il n'y a pas de raison de croire que les autres modes du travail physiologique s'alimentent à une autre source et on peut admettre que, dans tous les tissus, l'effort intérieur et invisible qui est le fond même de leur activité a pour rançon une dépense de glycose. M. Chauveau l'a prouvé pour la glande parotide et la généralisation devient très légitime. Aussi bien, si nous sortons du règne animal, la physiologie végétale vient nous prodiguer les démonstrations sur ce point. La vie des êtres inférieurs, notamment la

végétation des mucédinées, constitue, en quelque sorte, l'illustration de cette grande loi de biologie générale. On ne peut pas faire végéter un champignon sans lui fournir un aliment hydrocarboné et la récolte qu'on obtient a pour mesure et pour rançon l'énergie dépensée dans la combustion de cet aliment. Le travail intérieur produit dans la synthèse créatrice s'alimente dans la destruction d'un hydrate de carbone (consulter : Duclaux, *Chimie biologique*). Dans le monde des plantes vertes, le phénomène prend une ampleur saisissante. Ici la vie se compose de deux actes, l'accumulation et la dépense des réserves alimentaires. C'est là que réside la dualité fonctionnelle de la plante. A côté du végétal accumulateur coexiste le végétal consommateur et, comme l'a dit Cl. Bernard, il n'entre point nécessairement dans la finalité de l'herbe d'être mangée par un herbivore. Non, ce n'est point pour une fin qui lui serait étrangère que le végétal opère la synthèse de l'amidon et accumule ce principe immédiat dans ses diverses cellules; c'est pour le consommer à la façon d'un animal et pour un but analogue, c'est pour y trouver la source de l'énergie qu'il dépense et qu'il transforme dans la poussée de ses organes nouveaux, c'est, en un mot, pour agir et pour manifester à sa manière l'énergie propre de ses tissus vivants. Cette destination de l'amidon végétal apparaît dans toute son évidence au moment où s'accomplissent les grandes fonctions de la plante : la germination, la floraison, la fructification, la poussée des bourgeons, des rameaux et des feuilles. Dans tous ces actes, on assiste à l'utilisation de l'amidon accumulé, on voit ce principe immédiat se dissoudre et émigrer vers tous les foyers de la végétation, pour y livrer, par sa combustion, l'énergie dépensée dans les productions nouvelles, aussi bien que le carbone engagé dans la synthèse formatrice. Le phénomène revêt donc un caractère de généralité absolue et on peut conclure que le glycose est l'aliment prochain et immédiat de l'activité, sous toutes ses formes.

Il était nécessaire d'exposer tout cela, car une théorie générale de la calorification doit se superposer à une théorie générale de l'alimentation. Celle-ci peut maintenant trouver sa synthèse dans une expression à la fois très simple et très précise : Les aliments sont les dépositaires de la matière et de l'énergie transformées dans l'organisme.

En ce qui touche les sources de la chaleur animale, ce double point de vue peut se ramener à un seul, car, sur un animal en équilibre de poids et d'azote, la rénovation de la matière est parfaitement neutre, puisque les effets thermiques de l'assimilation de l'albumine sont compensés par les effets antagonistes de la désassimilation. Parmi les termes de l'évolution de l'albumine, il n'y a donc à retenir que ceux qui s'opèrent dans le foie et concourent à la production du glycose. Ce qui domine, en un mot, et ce que l'on doit considérer surtout, c'est la genèse et la dépense du potentiel glycose, et du même coup on est conduit à formuler la théorie de la combustion comme source au moins principale de la chaleur animale.

L'évolution entière des principes immédiats au cours de leur utilisation et de leurs métamorphoses comporte, il est vrai, deux phases ou deux séries d'opérations. D'une part, la constitution des réserves de graisse et de glycogène et, d'autre part, la dépense de ces réserves. Les opérations du premier

groupe sont, en général, des phénomènes anaérobies de dédoublement et d'hydratation qui ne réclament pas l'intervention de l'oxygène et peuvent dégager du CO^2. Nous espérons établir, pourtant, qu'au point de vue de la thermogenèse, ces opérations sont exactement compensées, en ce sens que tout se passe comme si la combustion était le procédé exclusif de la dépense alimentaire. C'est ce que nous allons examiner dans les paragraphes suivants :

Théorie de la combustion. Bilan des combustions respiratoires et de l'alimentation. — L'oxygène consommé dans la respiration des animaux rend à peu près exactement compte de la combustion des aliments réellement dépensés dans le même temps. Nous entrons là dans un ordre de faits que l'on n'a pas coutume de retenir dans l'histoire de la chaleur animale et qui pourtant offrent le plus grand intérêt puisqu'ils apportent les présomptions les plus fortes en faveur de la théorie de la combustion. On peut retenir dans cette direction trois catégories de renseignements tirés : 1° de la nutrition des êtres inférieurs aérobies ; 2° du quotient respiratoire ; 3° de la statique chimique de la nutrition.

a. Renseignements tirés de la nutrition des êtres inférieurs. — Parmi les microbes aérobies qu'on peut étudier à ce point de vue, les mucédinées offrent un intérêt tout spécial parce qu'elles vivent à la façon des animaux. Inhabiles à la synthèse créatrice, puisqu'ils sont dépourvus de chlorophylle, ces végétaux ne peuvent se nourrir que d'aliments préformés. Ils peuvent, il est vrai, utiliser l'azote minéral (nitrates) et opérer la synthèse de l'albumine, mais ils ne sauraient vivre s'ils ne trouvent pas dans leur milieu des hydrates de carbone tout préparés. Parmi ces mucédinées l'*Aspergillus niger* constitue un objet d'étude tout à fait précieux, grâce aux patientes recherches de Raulin qui a fixé la composition optima de son milieu de culture et a permis d'en conduire la végétation avec la plus grande certitude. Or, offrons du glycose à ce champignon, il en fait deux parts : un tiers qu'il prélève pour fournir la substance hydrocarbonée de la récolte et deux autres tiers qui sont intégralement brûlés et fournissent ainsi l'énergie engagée dans l'effort de la végétation. L'*Aspergillus niger* procéderait de même à l'égard de l'amidon ou du sucre de canne, après les avoir digérés et transformés en glycose. Il procède de même à l'égard de l'alcool qu'il brûle intégralement et fait passer à l'état d'eau et d'acide carbonique. Que si le liquide de culture est imparfaitement aéré, comme il arrive dans une culture en vase clos, la combustion est imparfaite et s'arrête au terme acide oxalique C^2O^3.

Nous pourrions encore citer le *Mycoderma vini* qui brûle complètement l'alcool du vin et le résout en eau et en CO^2, ou le *Mycoderma aceti* dont l'action comburante s'arrête au terme acide acétique. Tous ces faits, qu'il est inutile de multiplier, apportent des clartés singulièrement vives sur la nature, sur le siège véritable, sur les matériaux de la combustion respiratoire et enfin sur sa finalité. Ce que nous devons en retenir pour le moment, c'est qu'il s'agit là d'une combustion véritable et dont les termes sont liés par un rapport défini exactement conforme à l'équation de la combustion. Les quantités d'oxygène consommé et d'acide carbonique produit par l'*Aspergillus niger* se nourrissant de sucre sont précisément dans la mesure et dans le rap-

port prévus par l'équation de la combustion du sucre qui réclame un volume d'oxygène et produit un volume de CO^2. De même, lorsque ce champignon ou le *Mycoderma vini* brûlent de l'alcool ils consomment un volume d'oxygène et produisent deux tiers de volume d'acide carbonique, comme le veut la théorie. En un mot, dans la respiration des êtres inférieurs, les échanges gazeux rendent exactement compte de la combustion des aliments dépensés dans la respiration et ne permettent pas de faire la moindre part aux phénomènes anaérobies. L'étude du quotient respiratoire chez les animaux supérieurs va nous conduire à une conclusion identique.

b. Renseignements tirés du quotient respiratoire. — Le quotient respiratoire d'un corps est le rapport en volume de l'acide carbonique produit à l'oxygène consommé dans la combustion de ce corps. Il est égal à 1 pour le sucre, à 0,666 pour l'alcool, 0,700 pour les graisses, 0,818 environ pour les albuminoïdes. Ces chiffres mesurent le quotient théorique, tel qu'on le tire, pour chaque substance, de l'équation de combustion de cette substance, et le problème est de le comparer au quotient réel, tel qu'il se manifeste dans les échanges gazeux de la respiration. Le quotient respiratoire ou quotient de Pflüger a été nettement déterminé pour la première fois par Regnault et Reiset, dans leurs mémorables recherches sur la respiration, et si Pflüger en a précisé les valeurs et montré toute l'importance, il ne faut pas oublier que Regnault et Reiset avaient parfaitement vu que sa valeur dépend du régime alimentaire. Cette dépendance s'est de plus en plus précisée et, grâce aux travaux de Pflüger, Von Mering et Zuntz, Wolfers, Potthast, Rubner, etc., on peut affirmer aujourd'hui que le quotient respiratoire réel égale, ou incline de très près à égaler le quotient théorique des principes immédiats qui forment la base de l'alimentation. Cette égalité est indiscutable quand on envisage des animaux en parfait équilibre de poids et de nutrition, et les nombreux faits que nous avons observés ne nous laissent à cet égard aucun doute. Chez un animal abondamment nourri avec des hydrates de carbone, le quotient respiratoire oscille autour de l'unité. Il descend à 0,800 en moyenne chez un chien nourri à la viande; enfin, sur un chien en inanition et vivant sur son albumine et ses graisses accumulées, il oscille autour de 0,750. Voilà ce que nous avons vu maintes fois et ce que nous voyons tous les jours. On peut donner à la démonstration une forme plus directe, si, à l'exemple de Von Mering et Zuntz, on fait l'épreuve des principes immédiats en les injectant dans les veines. L'animal, un lapin, déjà préparé par un jeûne suffisant, est soigneusement immobilisé et placé dans un bain à la température du corps (on verra plus tard la raison de ces précautions). Cela fait, on injecte très lentement, dans la jugulaire, un principe immédiat simple (glycose, peptone) et on détermine la valeur des échanges respiratoires tous les quarts d'heure. Dans ces conditions, voici ce qu'on observe : 1° le quotient respiratoire prend une valeur très voisine du quotient théorique, de la substance éprouvée; 2° après l'injection, le quotient reprend sa valeur initiale. Les mêmes épreuves ont été réalisées avec un égal succès sur des substances étrangères à l'alimentation, telles que l'acide formique (Zuntz) ou l'acide acétique (Mallevre).

De l'ensemble de ces faits on peut conclure que l'oxygène consommé et

l'acide carbonique produit dans la respiration des animaux sont liés par un rapport défini et tel qu'il serait dans l'hypothèse de la combustion des aliments. On en doit inférer que les aliments sont réellement brûlés.

c. RENSEIGNEMENTS FOURNIS PAR LA STATIQUE CHIMIQUE DE LA NUTRITION. — Le développement logique de ce qui précède conduit à ces deux propositions : L'oxygène consommé par un animal en équilibre de poids et de nutrition est précisément égal à celui qui serait nécessaire à la combustion des principes immédiats réellement dépensés par l'animal, dans le même temps. De même, l'acide carbonique absorbé dans les mêmes conditions est précisément égal à celui qui résulterait de la combustion de ces mêmes principes immédiats. Parmi les rares documents qui permettent de contrôler cette hypothèse, les résultats obtenus par Vierordt sont d'autant plus démonstratifs que cet expérimentateur n'obéissait à aucune préoccupation de doctrine. Vierordt a établi sur lui-même le bilan des *ingesta* et des *excreta* d'après la méthode inaugurée par Boussingault, mais en même temps il a mesuré sa consommation d'oxygène. On connaît ainsi les deux termes de la comparaison : d'une part, la nature et la quantité des principes immédiats réellement désassimilés, d'autre part, la consommation d'oxygène correspondant à cette désassimilation.

Cette consommation a été de $744^{gr},11$, soit $520^{lit},356$ dans les vingt-quatre heures. La ration comprenait : albuminoïdes, 120 grammes ; graisses, 90 grammes ; hydrates de carbone, 330 grammes. Mais à l'aide des tableaux dressés par Vierordt pour établir le budget des recettes et celui des dépenses, élément par élément, il est facile de déterminer la part de cette ration qui a été digérée et utilisée par l'organisme. Cette part se décompose ainsi : albuminoïdes, $101^{gr},25$; graisses, $76^{gr},88$; hydrates de carbone, 330 grammes. Ces divers principes réclameraient pour leur combustion les quantités suivantes d'oxygène :

Pour les albuminoïdes (jusqu'à l'urée).......	$101,25 \times 1,063 = 101^{lit},877$
Pour les graisses..........................	$76,88 \times 2,049 = 157^{lit},527$
Pour les hydrates de carbone...............	$330 \times 0,828 = 273^{lit},240$
Total de l'oxygène réclamé...	$= 532^{lit},644$

Or la consommation réelle d'oxygène a été de $520^{lit},356$. Ce qui donne un rapport de $\frac{520,356}{532,644} = 0,977$ entre la quantité d'oxygène réclamée par la théorie et celle qui a été réellement employée.

Pour l'acide carbonique, nous arrivons entre les quantités théoriques et les quantités réelles à un rapport de 1,010. Tous ces écarts sont insignifiants. Ils entrent, sans doute, dans la limite des erreurs inévitables de l'expérimentation.

Mais si décisifs et si démonstratifs que paraissent ces faits, il n'est pas moins nécessaire de soumettre la théorie de la combustion à une vérification à la fois physique et chimique. Bien des objections se dressent contre elle. Assurément, la combustion restera, quoi qu'on fasse, le procédé dominateur de la dépense alimentaire ; mais, en même temps qu'ils sont brûlés,

les principes immédiats donnent lieu, comme nous le disions plus haut, à des réactions indépendantes de l'oxygène et dont on ne saurait méconnaître l'influence thermique. Ces réactions sont des dédoublements, des hydratations ou des déshydratations, et parmi elles il en est, comme les dernières, qui, loin de produire de la chaleur, en consomment. A côté des réactions exothermiques, il y a des réactions endothermiques et tous ces intermédiaires produisent des effets thermogènes qui se mêlent dans une proportion indéterminée avec ceux de la combustion pure. D'autre part, l'oxygène produit des quantités inégales de chaleur selon qu'il brûle telle ou telle catégorie de principes immédiats, qu'il les brûle complètement ou incomplètement. En un mot, la chaleur animale apparaît comme une résultante dans laquelle la part de la combustion demeure indéterminée.

La réalité de ces faits est indiscutable, et, loin de méconnaître l'importance des phénomènes anaérobies, nous les considérons comme les préliminaires indispensables de l'élaboration des aliments et nous y voyons les procédés essentiels de la glycogénie hépatique. C'est sous cet aspect que nous aurons à les étudier dans notre critique ultérieure. Pour le moment, ils font naître de très fortes préventions contre la théorie de la combustion considérée comme la source exclusive de la chaleur animale. Mais, si fortes que soient ces préventions et si justifiées qu'elles paraissent *à priori*, elles n'excluent point cette question de fait : vérifier la théorie de la combustion. Il est toujours possible expérimentalement et il est nécessaire de comparer la chaleur produite par un animal à la chaleur qu'il devrait produire dans l'hypothèse de la combustion et à partir de ses combustions. S'il y a un écart entre ces deux termes, il nous donnera précisément la part des phénomènes anaérobies dans la production de la chaleur animale.

Tel est le problème expérimental qui se pose et le moment est venu de faire l'histoire, des recherches auxquelles il a donné lieu. Raconter cette histoire c'est raconter celle de la théorie de la combustion, et au seuil même de notre enquête nous trouvons l'œuvre de Lavoisier.

Cette œuvre a eu une immense portée et il serait malaisé d'en exagérer la grandeur. Lavoisier n'a pas seulement fondé la chimie ; il a également inauguré la physiologie par la plus brillante et la plus féconde des découvertes, car la théorie et les faits apportés par l'illustre créateur donnaient déjà leur véritable sens aux grandes fonctions de l'organisme. Mais la grandeur de l'œuvre ne doit pas faire oublier le passé qui a porté les éléments de sa formation. Comme tous les créateurs, Lavoisier a dû partir de la science de son temps et il importe de s'arrêter quelques instants devant le long effort qui avait conduit la science jusqu'à lui.

Historique. — Les explications fournies sur les sources de la chaleur animale se ramènent à trois groupes de théories : les théories vitalistes, les théories mécaniques et les théories chimiques.

Théories vitalistes. — Aristote et Galien admettaient un principe autonome et engendrant la chaleur dans un acte initial et par une véritable création. La chaleur n'a pas d'origine, elle est innée. Le principe de la chaleur aurait sa résidence dans le cœur, le cœur gauche pour Galien, et le cœur

droit pour Aristote. Hunter accueillit la conception aristotélique, mais il plaça dans l'estomac le siège de la chaleur innée. Chose singulière! ces théories vitalistes, qui devaient céder à l'esprit de libre examen au moment de la Renaissance et semblaient ne pouvoir survivre à l'influence des chimiatres et des iatro-mécaniciens, étaient appelées à renaître plus tard et, sous une forme à peine rajeunie, à se retrouver, longtemps après Lavoisier, dans des œuvres qui sont presque de notre temps. Pour Barthez et son École, les phénomènes de frottement et d'agitation qui engendrent la chaleur sont entretenus et dirigés par le principe vital. Et, que si l'échauffement du corps tend à dépasser la mesure qui convient, il est immédiatement neutralisé par les effets refroidissants de la ventilation pulmonaire. Cette dernière idée est une pure réminiscence aristotélique. Plus tard, dans l'esprit de Brodie et de Chossat, le principe générateur du calorique ne fait que changer de résidence; il siège soit dans le système nerveux de la vie de relation (Brodie), soit dans le grand sympathique (Chossat). Ce qu'il y a d'étrange, c'est que les auteurs de ces fictions prétendent en trouver la justification dans les réalités de l'expérience.

Théories mécaniques. — Les iatro-mécaniciens rapportaient tous les phénomènes de la vie à des actions mécaniques. Dès lors, pour eux, la chaleur animale provenait des mouvements si variés qui s'accomplissent dans l'organisme et des frottements qui en résultent. Le frottement du sang contre les parois des vaisseaux, et notamment des capillaires, était une source particulièrement abondante de chaleur. Telle est la doctrine soutenue par Martine, Hales, Boerhaave et Haller qui voulut lui donner la précision des mathématiques. Sa destinée fut très courte, mais elle eut l'honneur immérité de susciter les révoltes et les colères de d'Alembert.

Théories chimiques. — La révolution philosophique de la Renaissance vint délivrer la science de la tyrannie des traditions aristotéliques qui avaient pesé si lourdement sur les esprits pendant toute la durée du moyen âge. La conception vitaliste de la chaleur animale se complétait, on vient de le voir, par cette idée singulière que la respiration était faite pour rafraîchir le sang et neutraliser l'excès de la chaleur innée. Mais Van Helmont (1577-1664) découvrit l'acide carbonique (*air sylvestre*) et constata que ce gaz est impropre à entretenir la respiration aussi bien que la combustion des corps en ignition. Il devenait évident que tous les gaz ne sont pas propres à entretenir la respiration et qu'ils n'agissent pas par une intervention purement physique. La théorie du refroidissement était ruinée du même coup. Un nouvel et grand progrès fut apporté par Robert Boyle (1626-1694) qui, agissant sur diverses espèces animales et notamment sur des poissons à l'aide de la machine pneumatique, montra que ceux-ci respirent, non pas l'eau qui arrose leurs branchies, mais bien l'air en dissolution dans l'eau.

A peu près à la même époque, Malpighi (1628-1694) découvrit le rôle des trachées des insectes et dès lors la respiration aérienne prenait le caractère d'un phénomène universel. On ne pouvait plus lui laisser le rôle insignifiant que lui attribuait Aristote. La nature chimique de ses phénomènes trouvait d'ailleurs une précision nouvelle dans les expériences de Robert Boyle, puis

de Hook (1664) démontrant que la respiration est accompagnée d'une altération de l'air qui le rend irrespirable. Robert Boyle, en effet, eut l'idée de pratiquer la respiration artificielle et il constata que l'opération n'est efficace et n'assure la survie de l'animal que si elle est dirigée de manière à renouveler l'air dans le poumon. Hook introduisit une nouvelle démonstration consistant à pousser dans le poumon un courant d'air pénétrant par la trachée et sortant au niveau d'une surface de section ménagée à la base du viscère à l'aide d'une incision assez profonde.

Il restait à déterminer la nature des opérations chimiques engagées dans la respiration. Mayoff (1646-1679), le plus illustre des précurseurs de Lavoisier, aurait peut-être touché au but s'il n'avait été enlevé par une mort prématurée. On peut dire qu'il a deviné l'oxygène. Il fut conduit à penser que l'air contient un élément vivifiant, seul capable d'entretenir la respiration et la combustion. C'est cet élément, *l'esprit nitro-aérien*, qui transforme en rouille la poudre de fer humide, et qui forme l'un des éléments constituants de l'esprit de nitre. C'est encore l'esprit nitro-aérien qui pénètre dans le sang pendant la respiration, s'y combine avec les parties sulfureuses pour transformer le sang veineux en sang artériel et produit la chaleur animale par les fermentations qu'il détermine. Mayoff fit aussi cette constatation très importante que l'air confiné est privé d'esprit nitro-aérien et impropre à entretenir la vie et la combustion des corps en ignition. Enfin il pressentit la respiration du fœtus et vit dans le placenta l'équivalent physiologique du poumon. L'altération chimique de l'air par la respiration devenait donc de plus en plus évidente. Elle se traduisait notamment par ses effets physiologiques et chimiques dans les expériences permettant de constater que l'air confiné est impropre à entretenir la vie et la combustion. Sur ce point il n'y avait pas de doute, et, à côté des expériences de Mayoff, il faut citer celles de Hales, Robert Boyle, Verrati et Cigna (de Turin). Mais il fallait préciser la nature de cette altération. Mayoff l'attribuait surtout à l'absence de l'esprit nitro-aérien, mais ce n'était point là le seul facteur et déjà Robert Boyle apercevait le second, puisqu'il croyait que l'air expiré contient de l'*air fixe* (acide carbonique). A cet égard, la démonstration définitive fut apportée par Black en 1757. Black (1728-1799) vit à son tour très nettement que le changement produit dans l'air salubre par la respiration est dû à la conversion d'une partie de cet air en air fixe. Il s'en assurait en soufflant à l'aide d'un tube dans de l'eau de chaux qui se troublait ou dans une solution d'alcali caustique qui perdait son alcalinité. Mais il n'inféra de ces faits aucune doctrine quelconque sur la respiration ni sur les sources de la chaleur animale.

Priestley (1733-1804) fit d'importantes découvertes. Non seulement il considéra l'air fixe (CO^2) comme un produit constant de la respiration et de la combustion, mais il démontra, le premier, que l'air saturé d'air fixe par le confinement s'épure de ce gaz et redevient respirable, si on y fait séjourner une plante. Plus tard enfin (1774), il découvrit l'oxygène qu'il nomma *air déphlogistiqué* et constata que l'air commun lui doit ses propriétés chimiques et physiologiques, qu'il est l'agent de la combustion et de la respiration et que le sang artériel lui doit sa rutilance.

Priestley était donc en possession de presque tous les faits qui permettaient d'asseoir la théorie de la respiration; mais, obsédé par la doctrine du phlogistique qui régnait en souveraine, il s'en inspira pour interpréter les échanges gazeux du poumon. Le but de la respiration, pour lui, est de débarrasser l'organisme du phlogistique, ou matière du feu introduit, avec les aliments. Cette épuration est l'œuvre de l'oxygène, c'est-à-dire de l'*air déphlogistiqué* qui, s'emparant du phlogistique du sang, en est rejeté à l'état d'*air phlogistiqué* (azote). Le sang en circulation se sature de phlogistique au cours de son mouvement et s'en débarrasse au niveau du poumon en le cédant à l'oxygène. Le sang veineux est noir parce qu'il est saturé de phlogistique, le sang artériel est rouge parce qu'il est délivré de ce phlogistique. Ainsi les brillantes découvertes de Priestley deviennent stériles. Instruit de tout ce qui pouvait le conduire à la vérité, le célèbre expérimentateur anglais en resta séparé par l'épaisse et obscure théorie du phlogistique. Celui-là seul pourra atteindre le but, qui aura assez de puissance et de liberté dans l'esprit, assez de génie en un mot, pour délivrer la science de cette conception aussi fausse que tyrannique. Ce fut Lavoisier (1743-1794). Ses premières découvertes eurent pour effet de ruiner la théorie du phlogistique et de lui substituer la théorie de l'oxydation. Dans son immortelle expérience de 1775 qui dura douze jours, il opérait successivement la synthèse et l'analyse de l'oxyde rouge de mercure, il établissait du même coup la préexistence de l'oxygène dans l'air atmosphérique et découvrait ce gaz une seconde fois sans connaître les travaux de Priestley; il montrait enfin que l'oxyde rouge se forme par la combinaison de l'oxygène avec le mercure et que la chaleur a pour effet de séparer ces deux corps et de les restituer dans leur état primitif. Ce fut le point de départ de sa théorie des oxydes. Dans la conception de Stahl et de ses héritiers, les métaux étaient des corps composés, des terres chargées de la matière du feu, imprégnées de phlogistique. Les terres (oxydes) étaient des corps simples débarrassés de leur phlogistique par la calcination. Entre les mains de Lavoisier, la balance eut raison de toutes ces erreurs et les terres devinrent des oxydes, c'est-à-dire des métaux combinés à l'oxygène. La théorie de l'oxydation était achevée, et la combustion devenait un cas particulier de l'oxydation. Mais Lavoisier devait encore faire une découverte du plus haut intérêt avant d'aborder fructueusement la physiologie de la respiration. En 1776, il détermina la composition chimique de l'acide carbonique. Il montra que ce gaz contient un volume d'oxygène égal au sien et se forme par la combinaison de l'oxygène et du carbone, qu'il résulte enfin de l'oxydation du carbone. Lavoisier pouvait désormais pénétrer dans le domaine de la physiologie et y porter les lumières de la chimie nouvelle qu'il venait de fonder. De ce côté, son œuvre se développe en une série de mémoires à tous égards remarquables et dont il importe de dégager les conclusions essentielles.

En 1777 (*Expériences sur la respiration des animaux*, in *Mémoires de l'Académie des sciences*, p. 183), Lavoisier établit que la respiration emprunte de l'oxygène et n'emprunte que de l'oxygène à l'air atmosphérique pour le remplacer par un volume sensiblement égal d'acide carbonique. Et à ce

propos il ouvre, sans la résoudre, la question de savoir si cette conversion de l'oxygène en CO^2 s'opère dans le poumon par la combinaison de l'oxygène et du carbone, ou si ce viscère est seulement le siège d'un échange de gaz entre le sang et l'atmosphère. Quoi qu'il en soit, la théorie de la respiration était faite. Le phénomène était une combustion et la théorie de la chaleur animale allait bientôt sortir de ce fait considérable. La même année, en effet (*Sur la combustion en général*, in *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1877, p. 592), Lavoisier affirme nettement que la chaleur animale est le produit de la combustion respiratoire, comme la chaleur émise par une bougie est le produit de la combustion de cette bougie. Considérant que les animaux sont d'autant plus chauds et produisent d'autant plus de chaleur que leur respiration est plus intense (il compare ici les animaux à sang chaud et les animaux à sang froid), il conclut « qu'*il y a une relation constante entre la chaleur de l'animal et la quantité d'air entrée ou au moins convertie en air fixe dans les poumons* ». Nous sommes là devant une des propositions les plus explicites de Lavoisier. Ici l'illustre créateur entre dans les détails. Il précise et il pose en quelque sorte l'équation de la chaleur animale. Il veut dire que le carbone brûlé par un animal rend compte de toute la chaleur produite par cet animal. Il a été facile plus tard de faire la critique d'une proposition aussi aventureuse et aussi risquée. Mais, au moment où Lavoisier la formulait, elle constituait l'expression la plus simple, la plus exacte et la plus large à la fois de la nouvelle doctrine. Après tout, nous verrons qu'elle est seulement incomplète et il nous sera facile de l'achever.

Lavoisier ne s'est pas contenté d'affirmer, il a voulu prouver; et, dans un nouveau mémoire (*Sur la chaleur*, in *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1780, p. 355), il poursuit la vérification de sa formule dans une expérience qui, si mauvaise qu'elle soit aux regards des contemporains, doit rester fameuse, tant pour les mérites de l'invention technique que pour l'importance de la théorie qu'elle consacrait. Au préalable, Lavoisier inaugure une méthode de calorimétrie, il imagine son calorimètre à glace à l'aide duquel il détermine, dans des essais préliminaires, la chaleur de combustion du carbone. Cela fait, il procède à l'expérience suivante : il mesure comparativement la respiration sur un cochon d'Inde et la calorification sur un autre animal de la même espèce et de même poids. Le premier animal brûle en dix heures $3^{gr},333$ de carbone dont la chaleur de combustion fait fondre $326^{gr},75$ de glace à 0°. Le second animal maintenu pendant dix heures dans le calorimètre fait fondre $341^{gr},08$ de glace. Les deux résultats sont très voisins et la chaleur recueillie au calorimètre est de très peu supérieure à la chaleur calculée en partant du carbone brûlé par l'animal. Le rapport de la chaleur calculée à la chaleur réellement émise est égal à $\frac{326,75}{341,08} = 0,96$. Nous reviendrons bientôt sur ce résultat. Dans un cinquième mémoire (*Sur les altérations qui arrivent à l'air dans plusieurs circonstances où se trouvent les hommes réunis en société*, in *Histoire de la Société royale de médecine*, 1782, p. 569), Lavoisier, revenant sur l'étude expérimentale de la respiration, constate le déficit du CO^2 produit par

rapport à l'oxygène consommé et il attribue l'excès de l'oxygène consommé à la combustion de l'hydrogène, en sorte qu'il a pu dire plus tard, donnant à sa théorie une forme de plus en plus précise (*Sur la respiration des animaux*, in *Mémoires de l'Académie des sciences*, 1789, p. 566) : « La respiration n'est qu'une combustion lente de carbone et d'hydrogène qui est semblable en tout à celle qui s'opère dans une lampe ou dans une bougie allumée, et, sous ce point de vue, les animaux qui respirent sont de véritables corps combustibles qui brûlent et se consument. » Il ajoute : « C'est l'air qui fournit l'oxygène, mais c'est le sang qui fournit le combustible et ce sont les aliments qui réparent ses pertes. » Sans l'alimentation, l'huile manquerait bientôt à la lampe et l'animal périrait comme la lampe s'éteint quand elle manque de nourriture. L'œuvre de Lavoisier embrassait ainsi toute la physiologie et il a pu la résumer dans cette conclusion synthétique : « La machine animale est principalement gouvernée par trois régulateurs principaux : la respiration qui consomme de l'hydrogène et du carbone et qui fournit du calorique ; la transpiration qui augmente ou diminue suivant qu'il est nécessaire d'emporter plus ou moins de calorique ; enfin la digestion qui rend au sang ce qu'il perd par la respiration et la transpiration. »

Tel est le monument élevé par Lavoisier. Il est à lui sans partage, et c'est en vain qu'on essayerait de lui en disputer la moindre parcelle pour l'attribuer à d'autres, même à Crawfort. Et d'abord, le premier écrit de celui-ci n'est venu qu'en 1779, deux ans après que Lavoisier avait formulé la théorie de la combustion et de la chaleur animale. D'autre part, Crawfort n'a pas fait autre chose que développer la théorie du phlogistique, à peu près dans les termes dont son maître Priestley s'était servi pour expliquer la formation de la chaleur chez les animaux. Ce n'est qu'en 1788 que Crawfort, éclairé par les travaux de Lavoisier, renonce au phlogistique pour admettre l'hypothèse d'un hydrogène carboné puisé par le sang dans les capillaires de la circulation générale, et brûlé dans le poumon, avec formation d'eau et d'acide carbonique.

La théorie de Lavoisier, vraie dans son expression générale, devait être complétée ou rectifiée sur deux points : le siège de la combustion respiratoire et la nature du combustible. Sur le premier point, il paraît évident qu'il ne s'est pas nettement prononcé ; il était incertain et il a pu croire passagèrement que la combustion avait son siège dans le poumon. C'était une double erreur de physique et de physiologie. Sur le second point, Lavoisier admettait la combustion directe du carbone et de l'hydrogène à l'état libre et, à cet égard, il a commis une erreur de chimie générale et de thermochimie. Car la combustion s'exerce primitivement sur les principes immédiats de l'alimentation et non sur leurs éléments. Examinons successivement ces deux points :

Siège réel de la combustion. — Nous n'avons pas ici à reproduire l'histoire de la respiration, ni à raconter la série des faits qui ont permis d'établir le siège réel de ce phénomène. Il suffit de rappeler sommairement l'intervention de Spallanzani et de Williams Edwards montrant que les animaux placés dans des atmosphères neutres continuent à dégager du CO^2, celle de Magnus procédant à l'extraction des gaz du sang et à l'analyse comparée de ces gaz dans

le sang artériel et dans le sang veineux. Si inexacts qu'ils fussent, les résultats obtenus par Magnus suffisaient déjà à préciser le sens des phénomènes, et c'est à lui qu'on doit la connaissance de ce fait : Le sang artériel est plus riche en oxygène et plus pauvre en acide carbonique que le sang veineux. Sous une autre forme, le sang veineux, en traversant le poumon, s'enrichit en oxygène qu'il emprunte à l'air inspiré et se dépouille d'une partie de son CO^2 qu'il rejette dans l'air expiré. La théorie de la respiration pulmonaire est là tout entière. Le poumon est seulement le siège d'un échange gazeux entre l'air venu du dehors et le sang apporté par l'artère pulmonaire. La découverte de Magnus, complétée et enrichie de tous les documents accumulés depuis, sur la composition des gaz du sang, obligeait à reculer jusqu'à la périphérie et jusque dans l'intimité des tissus le siège des combustions respiratoires, car les changements subis dans le poumon par le sang veineux sont réciproques et inverses de ceux que le sang artériel subit en traversant les tissus. Dans cette traversée, le sang laisse de l'oxygène et prend de l'acide carbonique. Les tissus sont donc les agents de la respiration, ce sont les tissus qui respirent et qui produisent la chaleur. Au point que, si on les sépare de l'organisme et si on les enferme dans un espace clos, on voit, par l'analyse de l'atmosphère limitée autour d'eux, qu'ils continuent, pendant quelque temps, et jusqu'à leur mort, à consommer de l'oxygène et à produire de l'acide carbonique. C'est là la respiration élémentaire des tissus vivants, et le phénomène est ici surpris dans son isolement, dans son autonomie, et à l'abri de toutes les conditions auxiliaires qui pourraient en masquer l'origine et le caractère. C'est encore à Spallanzani qu'appartient l'initiative. Mais l'illustre Italien a eu bien des imitateurs : Humbold, Liebig, Dubois-Reymond, Valentin, Matteucci, Paul Bert, Quinquaud, Tissot. Les recherches poursuivies par ce dernier au laboratoire de M. Chauveau, au Muséum, ont une importance considérable parce qu'elles ont mis hors de doute la nature vivante des phénomènes. Les échanges gazeux accomplis par les tissus frais et séparés du corps étaient volontiers considérés par quelques-uns, par Hermann surtout, comme des phénomènes cadavériques. En fait, tous les expérimentateurs n'avaient pas su préserver leurs expériences des effets de la putréfaction et leurs résultats pouvaient donner prise à l'objection d'Hermann. M. Tissot a opéré dans des conditions d'asepsie irréprochable soit en stérilisant, au préalable, les appareils et les muscles servant aux expériences, soit, ce qui est plus simple, en procédant à des expériences de courte durée. Les conclusions de l'auteur intéressent au plus haut degré la physiologie générale :

1° Sur un muscle extrait aseptiquement et placé dans un flacon stérilisé, la production du CO^2 va décroissant tous les jours et devient bientôt inappréciable (8e jour). Si on s'abstient de toute asepsie, la production du CO^2 suit une marche inverse et devient de plus en plus considérable.

2° Les muscles stérilisés et placés dans un appareil stérilisé ne dégagent jamais d'hydrogène ni d'azote, et, si on les conserve dans une atmosphère inerte, le volume de cette atmosphère demeure invariable.

3° Les muscles morts (tués par le chauffage à 42° ou morts spontanément après un séjour prolongé dans une atmosphère inerte) ne consomment pas

d'oxygène et ne modifient pas la composition de l'atmosphère qui les enveloppe.

4° Dans l'acide carbonique dégagé par un muscle, il faut faire deux parts : l'acide carbonique préformé imprégnant le muscle, et l'acide carbonique produit pendant l'expérience, provenant des combustions actuelles. Le premier se détermine dans une épreuve où le muscle est placé dans un gaz indifférent. On obtient alors par différence le volume réel du CO^2 résultant des combustions actuelles.

5° Le rapport du CO^2 produit à l'oxygène consommé est régi par des lois définies. La production du CO^2 est placée sous la dépendance directe de l'oxygène.

Les recherches si laborieuses et si précises de Tissot permettent ainsi d'affirmer avec certitude que les échanges gazeux des tissus vivant librement et séparés du corps ne sont pas une manifestation de la mort, mais possèdent indiscutablement le caractère d'un phénomène vital et d'une combustion réelle.

Dans ce cas, il devient utile de retenir les documents capables de donner la mesure de la respiration élémentaire dans les divers tissus. A cet égard, les chiffres donnés par Paul Bert sont devenus classiques et nous aurons à les utiliser. Pour l'instant, nous reproduisons ceux de Quinquaud qui semblent avoir été déterminés dans de bonnes conditions. Les voici :

				Par kilogramme et par heure.
100 gr. de	muscle	absorbent en 3 heures à 38°	23 cent. cubes.	76 cent. cubes.
—	cœur	—	21 —	70 —
—	cerveau	—	12 —	40 —
—	foie	—	10 —	33 —
—	rein	—	10 —	33 —
—	rate	—	8 —	26 —
—	poumon	—	7,2 —	24 —
—	tissu adipeux	—	6 —	20 —
—	os	—	5 —	16 —
—	sang	—	0,8 —	0,26 —

Le tissu musculaire tient, on le voit, le premier rang, et sa puissance respiratoire, rapprochée de sa masse, permettra de comprendre la prépondérance de son rôle dans la production de la chaleur animale. En revanche, le sang respire peu, et tous les expérimentateurs sont d'accord pour admettre que l'atmosphère gazeuse du sang artériel conserve une composition invariable depuis le cœur jusqu'à la périphérie. En qualité de milieu interne, le sang se borne à jouer le rôle d'intermédiaire. Selon l'heureuse expression de Quinquaud, il remplit l'office d'un messager fidèle, probe et économique.

Tels sont les principaux faits qui permettent d'étendre à toute la périphérie, et de reculer jusque dans l'intimité des divers tissus, le foyer des combustions et de la chaleur animale. Sur ce point, la théorie de Lavoisier trouve une première précision. Mais la théorie complète de la combustion considérée comme source exclusive de la chaleur animale signifie que les combustions rendent compte, à elles seules, de toute la chaleur produite par les animaux. La vérification de la doctrine soulève donc un problème expérimental, qui consiste à comparer la chaleur réellement produite à la chaleur calculée dans

l'hypothèse de la combustion. Or, pour établir correctement la balance de ces deux termes, il est nécessaire de disposer d'une part d'un bon calorimètre et d'autre part d'une base irréprochable de calcul.

Matériaux de la combustion. — Bases théoriques du calcul de la chaleur. — *a.* Période de Lavoisier. — Sur ce dernier point, Lavoisier s'est trompé. Il a calculé la chaleur à partir du carbone brûlé dans la respiration et de la chaleur de combustion de ce métalloïde. Mais les principes immédiats ne brûlent pas dans l'organisme à l'état de carbone ou d'hydrogène libre; ils brûlent tels qu'ils sont et, sous leur forme complexe, ils fournissent, comme nous allons le voir, plus de chaleur que les éléments qui les composent. Il convient d'ailleurs de se rappeler qu'au moment où il établissait expérimentalement la balance de la chaleur produite et de la chaleur calculée, Lavoisier ne faisait entrer en ligne de compte que le carbone de la respiration sans se préoccuper de l'hydrogène. C'est donc par une rencontre purement fortuite et sans doute fort heureuse à certains égards, par une combinaison d'erreurs dues à l'imperfection de sa technique, que Lavoisier n'a trouvé qu'un écart négligeable entre la chaleur réelle et la chaleur calculée.

Les continuateurs immédiats de Lavoisier, Dulong et Despretz (1884), sollicités par une question posée par l'Académie des sciences, entreprirent, à leur tour, des recherches pour soumettre à l'épreuve la théorie de la combustion. Ils employèrent d'ailleurs une technique plus correcte, au moins en apparence, que celle de Lavoisier, et ils admirent dans leurs calculs la part qui reviendrait à la combustion de l'hydrogène. Sur ce point, ils introduisaient une correction importante, et comme, d'autre part, ils déterminaient sur le même animal, et au même moment, la mesure des échanges respiratoires et de la chaleur, que par là même ils assuraient l'identité des conditions indispensables à la comparaison, ils avaient quelques chances de commettre des erreurs moins graves que celles de Lavoisier. En fait ils ont toujours trouvé un écart assez considérable entre la chaleur calculée et la chaleur produite. Le rapport de ces deux termes a varié de 0,68 à 0,83 dans les expériences de Dulong, et de 0,74 à 0,90 dans celles de Despretz. Il est impossible de dire la part d'erreur attachée à ces résultats qui sont nécessairement et doublement inexacts. Ils le sont en raison des vices de la technique adoptée par les deux expérimentateurs en dépit de leurs efforts, et nous ne pouvons pas nous arrêter ici à aucune critique; ils le sont aussi en raison de l'erreur de principe qui a présidé aux calculs, puisque Dulong et Despretz n'ont tenu compte que des éléments simples, le carbone et l'hydrogène, engagés dans la combustion respiratoire.

Pour ces motifs, il devient impossible de s'intéresser aux tentatives des auteurs qui se sont efforcés de redresser par des corrections arbitraires les résultats de Dulong et de Despretz, résultats qui, dans leur esprit, mettaient en péril la doctrine de Lavoisier.

On peut donc dire que dans cette première période le problème expérimental de la chaleur animale a été mal abordé, parce que les bases du calcul de la chaleur étaient fausses. Il fallait procéder non pas de la chaleur de combustion des éléments composant les principes immédiats alimentaires, mais bien de la chaleur de combustion de ces principes.

b. Période de Berthelot. — C'est ce qu'on a fait dans une deuxième période où les recherches ont pu s'inspirer des principes de la thermo-chimie tels que les a développés Berthelot dans l'œuvre considérable qu'il a consacrée à la mécanique chimique. On aurait pu prévoir *à priori* que la chaleur de combustion des principes immédiats de l'alimentation est différente de la chaleur de combustion des éléments qui composent ces principes.

Cette différence est régie par le théorème suivant : « L'oxydation totale d'un principe immédiat au moyen de l'oxygène libre, c'est-à-dire sa transformation intégrale en eau et en acide carbonique, dégage une quantité de chaleur égale à la différence entre les chaleurs de combustion de ses éléments et sa propre chaleur de formation depuis les mêmes éléments. » (Berthelot, *Mécanique chimique*, t. I, p. 95.) Or, la chaleur de formation des principes immédiats est négative. C'est-à-dire que leur formation consomme de la chaleur au lieu d'en dégager. La synthèse végétale qui rapproche les éléments inertes du dehors pour constituer les principes immédiats emprunte précisément l'énergie solaire, elle la déplace et l'emmagasine dans son œuvre chimique. Il en résulte qu'au moment de la combustion qui les détruit, les principes immédiats libèrent toute l'énergie qu'ils avaient empruntée au soleil, en même temps qu'ils dégagent la chaleur produite par la combustion de leurs éléments. Appliqué aux principes immédiats, le théorème précité de Berthelot ne formule donc plus une différence, mais une somme, et on peut le résumer en disant : La chaleur de combustion d'un principe immédiat est égale à la somme de la chaleur de combustion de ses éléments et de la chaleur consommée dans leur formation à partir de ces mêmes éléments. On voit que c'est le second terme de cette somme qui avait été méconnu par Lavoisier, par Dulong et par Despretz.

Il ne restait donc plus qu'à procéder à la détermination empirique des chaleurs de combustion des principes immédiats alimentaires. Pour cela, il suffisait d'employer de bonnes méthodes calorimétriques. On compte, de ce côté, un grand nombre de travaux (Frankland, Danilewsky), mais nous retiendrons exclusivement ceux de Berthelot (1887 et 1888), Stohmann (1884), Rubner (1885), parce que l'identité des résultats obtenus par ces trois expérimentateurs, dans des recherches indépendantes, garantit leur exactitude. Nous nous bornons à donner les chiffres mesurant la chaleur de combustion des principes immédiats alimentaires et de l'urée.

		Calories.
La combustion de 1 gramme	d'albumine dégage............	5,754
—	de graisse de porc dégage......	9,423
—	de glycose dégage............	3,692
—	d'amidon —	4,116
—	d'urée —	2,523

Mais il est nécessaire de prévoir le cas des oxydations imparfaites. D'une manière générale, on peut dire que les hydrates de carbone et les graisses ubissent, dans l'organisme, une combustion complète qui les résout en eau et en acide carbonique. Il n'en est pas de même des principes albuminoïdes dont la combustion s'arrête à un certain nombre de termes azotés parmi lesquels le plus important est l'urée. Or, la mesure de la chaleur dégagée dans

les oxydations imparfaites est régie par le théorème dit de l'état initial et de l'état final. L'expression générale de ce théorème tel que l'a formulé Berthelot est quelque peu complexe. Aussi, pour simplifier, nous nous bornerons à énoncer le théorème des oxydations incomplètes qui n'est qu'un cas particulier du précédent : « L'oxydation incomplète d'un principe immédiat par l'oxygène libre dégage une quantité de chaleur égale à la différence entre la chaleur de combustion du principe et celle des produits actuels de sa transformation. » (Berthelot, *Mécanique chimique*, t. I, p. 96, 1879.) Appliqué à l'albumine, ce théorème permet aisément de calculer la chaleur abandonnée à l'organisme par ce principe immédiat, au moment de sa combustion jusqu'au terme urée. On sait que 1 gramme d'albumine produit $0^{gr},355$ d'urée; il vient donc pour la chaleur réellement livrée par l'albumine : $5,754 - (0^{gr},355 \times 2,523) = 4^{cal},860$. Berthelot et Stohmann adoptent ce dernier chiffre, mais Rubner considère que l'urée n'est pas le seul terme de l'excrétion azotée et qu'il ne peut suffire à mesurer la chaleur de combustion retenue par les produits de la désassimilation des albuminoïdes. Aussi ce physiologiste s'est-il proposé de déterminer directement la chaleur réellement livrée par la combustion organique des aliments albuminoïdes. Par exemple, pour évaluer la chaleur de combustion de la viande, il fait consommer par un chien à jeun une certaine quantité de cet aliment, et il détermine au calorimètre la chaleur de combustion de l'urine et des excréments secs qui renferment précisément les produits de désassimilation de la viande ingérée par l'animal; il obtient ainsi par différence la chaleur réellement produite par la ration, et il arrive au chiffre de $4^{cal},047$ comme mesure de la chaleur de combustion de la viande. Ce chiffre nous semble beaucoup trop faible. En tous cas, nos propres recherches, qui seront exposées plus bas, s'accordent bien avec le chiffre théorique $4^{cal},860$ adopté par Berthelot et par Stohmann.

Ces principes généraux et ces faits étant établis, il est possible de poser les bases du calcul de la chaleur que l'animal produirait, dans l'hypothèse de la combustion. Ce calcul peut être fait soit à partir du combustible, les aliments réellement dépensés, soit à partir du comburant, l'oxygène consommé par l'animal, pendant son séjour dans le calorimètre.

Évaluation de la chaleur théorique à partir des éléments dépensés. — Rubner a adopté la première de ces bases et il a poursuivi avec le plus grand succès la vérification de la théorie de la combustion. L'expérimentateur allemand s'est servi d'un calorimètre à air disposé de manière à assurer la plus parfaite exactitude dans ses indications. La dépense alimentaire de l'animal en expérience est évaluée par l'analyse des excreta : azote total des urines et carbone de la respiration. Rubner s'abstient de mesurer la consommation d'oxygène dans la crainte de commettre des erreurs. L'albumine, calculée à partir de l'azote, appelle un volume déterminé de CO^2 qui est défalqué de celui de la respiration. Le CO^2 restant est attribué à la combustion de la graisse.

Les expériences ont été faites en trois séries portant sur un chien soumis successivement, à l'inanition, au régime de la graisse et à celui de la viande. Chaque série a comporté quatre ou cinq séances d'une durée de vingt-quatre

heures au terme desquelles on procédait à la détermination des excreta. Nous résumons dans le tableau suivant les résultats moyens obtenus par Rubner dans ces conditions :

RÉGIME.	DURÉE de la période.	AZOTE total.	CARBONE de la graisse.	CHALEUR de l'albumine.	CHALEUR de la graisse.	TOTAL de la chaleur calculée.	CHALEUR réellement produite.	RAPPORT du 1er au 2e terme.
Inanition...	5 jours.	7gr,12	90gr,84	178cal,5	1117,5	1296,2	1305,13	0,993
Graisse.....	5 jours.	6gr,63	110gr,50	165cal,3	1345,5	1510,8	1496,10	1,009
Viande....	6 jours.	60gr,57	54gr,40	»	»	2249,6 (?)	2276,8	0,998

En résumé, l'expérience fait ressortir une égalité à peu près complète entre la chaleur réellement émise par l'animal et la chaleur calculée à partir de ses excréta ; l'écart est toujours très faible et il se produit en un sens ou en l'autre. Il est donc, semble-t-il, tout à fait accidentel, et on peut le négliger. Il est donc légitime de conclure que, dans les conditions où s'est placé Rubner, et dans la limite de ses expériences, la chaleur produite par un animal en un temps donné est égale à la chaleur qui résulterait de la combustion des aliments désassimilés par cet animal dans le même temps.

Évaluation de la chaleur théorique à partir de l'oxygène consommé.— Dans l'ordre chronologique se placeraient ici les travaux de Kaufmann, mais nous avons plus d'avantages à en différer l'examen, pour nous arrêter maintenant sur la méthode que nous avons adoptée pour évaluer la chaleur théorique (*Archives de physiologie,* 1898). Cette méthode repose sur ce fait qu'il existe un rapport défini et invariable entre la chaleur produite par la combustion des différents principes immédiats, et l'oxygène employé dans cette combustion. Les différentes valeurs de ce rapport figurent dans le tableau ci-dessous à côté des termes qui ont servi à l'établir (Voy. colonne 9) :

SUBSTANCES	CHALEUR PRODUITE par la combustion de 1gr.	OXYGÈNE consommé dans cette combustion		ACIDE carbonique produit dans cette combustion		QUOTIENT respiratoire.	CHALEUR répondant à		CHALEUR répondant à	
		en poids.	en volume.	en poids.	en volume.		1 gr. d'oxyg.	1 litre d'oxyg.	1 gr. de CO^2.	1 litre de CO^2
	cal.	gr.	lit.	gr.	lit.		cal.	cal.	cal.	cal.
Substance musculaire sèche (1)	4,047	1,335	0,934	1,437	0,729	0,781	3,031	4,334	2,816	5,551
(albumine) jusqu'à l'urée (2)..	4,860	1,520	1,063	1,720	0,868	0,818	3,197	4,576	2,825	5,599
Graisse (de porc).	9,423	2,930	2,049	2,817	1,434	0,703	3,215	4,598	3,341	6,571
Glycose.........	3,692	1,067	0,746	1,467	0,746	1,000	3,460	4,949	2,511	4,949
Amidon.........	4,123	1,185	0,828	1,630	0,828	1,000	3,479	4,979	2,529	4,979

(1) D'après Rubner. — (2) En partant de l'équation de la combustion et de la formule de Lieberkuhn.

Du pouvoir thermogène de l'oxygène. — Les différents chiffres de la colonne 9 expriment la quantité de chaleur produite par chaque litre d'oxygène employé dans la combustion des différents principes immédiats, cette combustion s'arrêtant au terme urée pour les albuminoïdes. Ils représentent donc une constante propre à chaque cas particulier de l'alimentation et mesurent ce que nous proposons d'appeler le pouvoir thermogène de l'oxygène.

Le tableau précédent contient aussi le rapport de la chaleur produite à l'acide carbonique dégagé dans la combustion des différents principes immédiats, et ce rapport pourrait également servir au calcul de la chaleur théorique, mais il y a plus d'avantage à employer le pouvoir thermogène de l'oxygène.

Si la théorie de la combustion est exacte, la réalité expérimentale doit faire ressortir entre la chaleur produite par un animal et l'oxygène consommé par cet animal pendant la durée de son séjour dans le calorimètre, un rapport précisément égal à celui que la théorie fait prévoir. En un mot, l'épreuve de la théorie de la combustion consiste à déterminer la valeur réelle prise par le pouvoir thermogène de l'oxygène dans les divers modes de l'alimentation et à rechercher si cette valeur réelle concorde avec la valeur théorique.

Une enquête de ce genre est d'autant plus nécessaire que les résultats obtenus par les différents auteurs offrent la plus grande divergence. En dépouillant les faits épars dans les travaux des rares physiologistes qui ont mesuré simultanément la chaleur produite et l'oxygène consommé, on est frappé de l'incohérence des résultats et, disons-le hardiment, de leur invraisemblance. La valeur moyenne du pouvoir thermogène de l'oxygène est de $4^{cal},775$; or, en dépouillant les chiffres fournis par Sigalas (*Recherches de calorimétrie*, thèse de doctorat, 1896), nous arrivons aux valeurs suivantes : $5^{cal},212$ pour le chat, $6^{cal},497$ pour le cobaye, $5^{cal},362$ pour les lapins de petite taille et $6^{cal},802$ pour les adultes. En partant des résultats obtenus par Desplats (*Journal de l'anatomie et de la physiologie,* 1886), nous obtenons des chiffres encore plus discordants : $7^{cal},064$ pour le rat, $7^{cal},722$ pour le cochon d'Inde et $4^{cal},847$ pour les oiseaux.

Aucun de ces chiffres n'est conforme aux prévisions de la théorie. En tout cas, leur valeur dépend, plus qu'il ne conviendrait, de l'expérimentateur qui les a obtenus et de l'espèce animale qui a servi à les obtenir. A ne considérer que ce dernier facteur, il faudrait conclure que chaque espèce animale a sa chimie propre et ses procédés de thermogenèse, ce qui est inadmissible. Il est vrai qu'en rapprochant les résultats fournis par M. Kaufmann, on constate que dans les expériences de ce physiologiste le pouvoir thermogène de l'oxygène prend à peu de chose près, et dans chaque cas, la valeur prévue par la théorie; mais cette circonstance n'a pas suffi à nous convaincre et il nous a paru nécessaire de reprendre la question, en faisant abstraction de tout le passé, et d'introduire, pour la résoudre, une technique irréprochable.

La valeur prise par le pouvoir thermogène de l'oxygène constitue donc le critère qui nous permettra de juger de la valeur de la théorie de la combustion. Si cette théorie est exacte, le pouvoir thermogène réel doit être égal au pouvoir théorique. Par corrélation, la chaleur réellement produite doit être trouvée égale à la chaleur calculée à partir de l'oxygène consommé... Il ne

reste plus qu'à fixer la valeur du pouvoir thermogène théorique dans les divers modes de l'alimentation. Dans le cas du jeûne et du régime azoté, cette valeur est immédiatement donnée par le tableau précédent, car on sait que tout animal privé d'aliments vit sur ses graisses et sur ses muscles. On peut donc dans ces deux cas assigner pour valeur au pouvoir thermogène de l'oxygène les chiffres 4,598 ou 4,576, soit, en chiffres ronds, $4^{cal},600$.

Dans le cas du régime hydrocarboné, la combustion s'exerce également, et sur l'albumine entraînée par la rénovation de la matière vivante, et sur les graisses chargées de fournir le glycose supplémentaire dès que les réserves du premier repas sont entamées.

Contrairement à l'hypothèse que nous avons admise dans le travail précité, il ne nous paraît pas possible de déterminer le pouvoir thermogène de l'oxygène, à partir du quotient respiratoire. Mais on peut tourner la difficulté en prenant pour base le rapport des principes azotés aux principes non azotés de la ration (relations nutritives). On peut admettre que, chez les herbivores, le rapport oscille entre $\frac{1}{5}$ et $\frac{1}{6}$. Dans cette hypothèse, qui se rapproche autant que possible de la vérité, les trois quarts de l'oxygène sont consacrés à la combustion du glycose, tandis que l'albumine n'en réclame que le quart. Dès lors, 1 litre d'oxygène produit :

D'une part : $0,75 \times 4,960 = 3^{cal},720$ (combustion du glycose) ;
D'autre part : $0,25 \times 4,6 = 1^{cal},150$ (combustion de l'albumine).

Ce qui fait ressortir, pour le pouvoir thermogène de l'oxygène, dans le cas du régime herbivore, une valeur très voisine de $4^{cal},870$.

Cela posé, le problème devient maintenant purement technique et il consiste à déterminer la valeur *absolue* de la chaleur produite par un animal et des échanges respiratoires de cet animal, pendant la durée de son séjour dans le calorimètre. La méthode que nous avons adoptée pour la mesure de la chaleur animale repose sur l'emploi des calorimètres à eau. Nous ne pensons pas qu'en dehors de cette méthode, qui fournit directement et immédiatement des indications en calories, on puisse obtenir des déterminations rigoureusement exactes. En tout cas, on peut donner à cette méthode. qui est celle des physiciens, de telles dispositions qu'elle convienne aux usages de la physiologie et que la part nécessaire de l'erreur soit réduite à un minimum négligeable. C'est à quoi nous sommes parvenu par l'installation de deux calorimètres semblables et semblablement placés, de telle façon que l'un d'eux témoigne des effets de la température extérieure et apporte ainsi les éléments d'une correction rigoureuse. Au début de l'expérience de calorimétrie, les deux appareils, garnis d'une masse d'eau dont la température est inférieure de plusieurs degrés à celle du laboratoire, tendent à s'échauffer et s'échauffent inégalement. L'écart de leurs températures, à un moment quelconque, est fonction de l'intensité de la source dont on veut déterminer le débit. Le problème est de discerner dans l'échauffement total du calorimètre la part qui revient à la température extérieure. Cette part est donnée par l'échauffement du témoin, à la condition d'effectuer une correction très simple, en partant de

la loi de Newton. Nous ne pouvons ici que faire connaître le principe de notre méthode et renvoyer, pour les détails, au mémoire que nous lui avons consacré (*Archives de physiologie*, 1898).

Quant à la détermination des échanges gazeux, elle est également réalisée dans des conditions capables d'assurer une exactitude à peu près complète; mais ici encore nous devons nous abstenir de toute description technique, pour nous en référer au mémoire précité et à nos divers travaux sur la respiration.

Comparaison de la chaleur réelle et de la chaleur calculée à partir des combustions respiratoires. — Cette comparaison a été poursuivie sur des animaux de différentes espèces et placés dans des conditions définies d'alimentation. Nous avons étudié successivement l'influence de l'inanition, du régime azoté et du régime hydrocarboné. Nous ne pouvons pas exposer en détail toutes nos expériences, mais, comme la direction n'en a jamais varié, quelle que fût l'espèce animale ou la durée des séances, nous pouvons légitimement en totaliser les résultats pour chacune des conditions alimentaires qui ont été étudiées.

A. Dans l'inanition. — Nos expériences ont porté sur deux cobayes, un lapin, un canard et trois chiens; elles ont eu une durée totale de trente heures. Voici les chiffres totalisés qu'elles nous ont permis de recueillir :

Oxygène consommé		$82^{lit},812$
Pouvoir thermogène de l'oxygène	théorique	$4^{cal},600$
	réel	$4^{cal},653$
Quotient respiratoire moyen		0,766
Chaleur calculée $= 82,812 \times 4,6$		$380^{cal},935$
Chaleur réelle		$385^{cal},403$
Rapport du premier au deuxième terme		0,988

B. Dans le cas du régime azoté. — Nos expériences ont porté sur deux chiens, d'un poids moyen de $3^{k},700$. Les animaux recevaient 300 grammes de viande deux heures avant leur entrée dans l'appareil. Deux expériences d'une durée totale de vingt heures.

Oxygène consommé		$51^{lit},683$
Quotient respiratoire		0,816
Pouvoir thermogène de l'oxygène	théorique	$4^{cal},600$
	réel	$4^{cal},632$
Chaleur calculée		$237^{cal},741$
Chaleur réelle		$239^{cal},431$
Rapports du premier au second terme		0,992

C. Dans le cas du régime hydrocarboné. — Ici nos expériences sont très nombreuses et très variées. Elles ont porté sur le cobaye, le lapin, le canard et le chien. Nous en totalisons encore les résultats.

Durée totale des expériences		120 heures.
Oxygène consommé		$280^{lit},233$
Quotient respiratoire moyen		0,917
Pouvoir thermogène de l'oxygène	théorique	$4^{cal},870$
	réel	$4^{cal},893$
Chaleur calculée		$1364^{cal},734$
Chaleur réelle		$1371^{cal},364$
Rapport du premier au deuxième terme		0,995

Il ne faudrait pas croire que cette perfection dans les résultats est due à leur fusion et que nous ayons eu l'intention de noyer ou de dissimuler dans des moyennes impénétrables des écarts plus ou moins graves et plus ou moins compromettants. Il nous suffira de dire que, dans cette série, le rapport de la chaleur calculée à la chaleur réelle a eu les valeurs suivantes : 0,990 (cobaye), 0,986 (lapin), 0,982 (canard) et 1,005 (chien). Il est indispensable d'ajouter que toutes nos expériences ont été faites à une température supérieure à 15°, ce qui nous a mis à l'abri des troubles étranges que le froid serait capable d'introduire dans les procédés de la thermogenèse et qui feront l'objet d'un paragraphe ultérieur. Nous pouvons donc conclure : Dans l'inanition et dans les modes normaux de l'alimentation, quelle que soit la durée de l'expérience et quelle que soit l'espèce animale, le rapport de la chaleur produite à l'oxygène consommé, c'est-à-dire le pouvoir thermogène de l'oxygène, prend une valeur sensiblement égale à celle que lui assigne la théorie de la combustion, *dans les conditions alimentaires considérées*. Par corrélation, la chaleur réellement produite par un animal soumis à un régime alimentaire déterminé est précisément égale à la chaleur calculée à partir de l'oxygène consommé dans le même temps par cet animal.

Neutralité des phénomènes anaérobies. — Les conclusions qui précèdent ne signifient pas que la combustion est le seul mode de la dépense alimentaire. Elles prouveraient seulement que tout se passe comme si la combustion était la seule réaction intervenant dans les métamorphoses régressives des aliments. Il faut donc admettre que les phénomènes anaérobies qui président nécessairement à l'élaboration des principes immédiats sont neutres aux points de vues thermique et respiratoire. Sous une autre forme, ils ne changeraient point ni la quantité de chaleur ni le volume des gaz attachés à la combustion des principes immédiats. C'est là un point de fait qui découle immédiatement de nos expériences, si on admet que ces expériences sont exactes. Mais il est nécessaire de montrer que ce point de fait concorde avec les prévisions de la théorie, et il suffit pour cela de faire le bilan de la matière et de l'énergie engagées dans les réactions anaérobies qui peuvent être conçues comme présidant à l'élaboration des aliments. Toutes ces réactions sont liées aux opérations de la glycogénie hépatique et ont pour but d'assurer en permanence l'élaboration du potentiel glycose indispensable à la production du travail physiologique. Comme nous l'avons démontré plus haut, les graisses de l'organisme forment dans la vie normale une réserve toujours disponible où, dès les premières atteintes portées aux provisions alimentaires, le foie puise les matériaux de la glycogénie. C'est là le fait primordial et capital d'où il faut partir. Aussi est-il indispensable de revenir sur l'équation proposée par M. Chauveau pour traduire le procédé de la glycogénie adipeuse.

$$(1)\quad \left\{\begin{array}{ll} C^{57}H^{110}O^{6}\ldots & (0{,}890) \\ \text{(Stéarine)} & \\ +\,67\,O^{2}\ldots\ldots & \underline{(1{,}072)} \\ & 1{,}962 \end{array}\right\} = \left\{\begin{array}{ll} 8(C^{6}H^{12}O^{6})\ldots & (1{,}440) \\ +\,9\,CO^{2}\ldots\ldots & (0{,}396) \\ +\,7\,H^{2}O\ldots\ldots & \underline{(0{,}126)} \\ \text{Total égal}.. & 1{,}962 \end{array}\right\}$$

D'où on tire que 1 gramme de graisse produit 1gr,61 de glycose qui s'écoule

vers les tissus et se consomme au fur et à mesure de sa production. L'oxydation de la graisse s'effectue ainsi en deux phases : une phase hépatique (élaboration du potentiel) et une phase périphérique (consommation du potentiel) ; mais sur l'animal au repos tout se passe comme si l'oxydation avait lieu en un seul temps.

Pendant l'inanition, la glycogénie adipeuse constitue, avec le mouvement inévitable et permanent de l'histolyse, le fait unique de la nutrition. On peut admettre avec M. Chauveau que ce processus de l'inanition n'est jamais interrompu et se poursuit chez les animaux alimentés (*La vie et l'énergie*). L'alimentation n'aurait pas d'autre effet que de renouveler les réserves de graisse préposées à la glycogénie. Tous les aliments aboutissent au sucre et y aboutiraient à travers les graisses de l'organisme. L'adipogénie apparaîtrait ainsi comme une phase inévitable de l'utilisation des divers principes immédiats (1). Le moment est donc venu précisément d'examiner cette phase d'élaboration préliminaire et de retenir les réactions anaérobies qui y sont attachées et qui viennent compliquer le problème de la chaleur animale.

a. Évolution des hydrates de carbone. — Il est au moins certain que les hydrates de carbone subissent partiellement un dédoublement, avec production de graisse et dégagement de CO^2. On en est averti par les changements du quotient respiratoire qui dépasse l'unité et trahit un excès de CO^2 dans les moments qui suivent le repas. L'opération peut s'exprimer par l'équation suivante de M. Hanriot :

$$\underset{\text{Glycose.}}{3(C^6H^{12}O^6)}\ (2{,}340) = \begin{cases} C^{75}H^{104}O^6\ (0{,}860) \\ +23\,CO^2\ (1{,}012) \\ +26\,H^2O\ (0{,}468) \end{cases}$$

Total égal............ 2,340

D'où on tire que :

$$1 \text{ gramme de glycose produit} \begin{cases} 0^{gr},367 \text{ de graisse.} \\ 0^{gr},432 \text{ de } CO^2. \\ 0^{gr},200 \text{ de } H^2O. \end{cases}$$

Dans la deuxième phase, la graisse formée par dédoublement se transforme en glycose, conformément à l'équation (1) et le glycose produit devient la proie des combustions périphériques. Telle est l'expression que peut revêtir l'évolution entière des hydrates de carbone. Toute autre expression serait équivalente, puisqu'elle serait obligée de tenir compte des proportions définies qui unissent le sucre à ses dérivés. Or, nous allons voir que cette évolution produit la même quantité de chaleur et donne lieu aux mêmes échanges gazeux que l'utilisation immédiate par oxydation directe du sucre.

A. — *Bilan des échanges gazeux dans les deux modes de l'utilisation du glycose.*

(I) Oxygène consommé dans l'utilisation de 1 gr. de glycose............	1° Par oxydation directe	....	1gr,067
	2° Par dédoublement	oxydation en deux temps des 0gr,367 de graisse issue du dédoublement..............	1gr,075
		Différence..............	0gr,008

(1) En tout cas, elle intervient nécessairement sur l'animal alimenté, dès que les réserves alimentaires en hydrates de carbone commencent à être insuffisantes.

(II) CO² dégagé dans l'utilisation de 1 gr. de glycose...............	1° Par oxydation directe..................			$1^{gr},467$
	2° Par dédoublement...	CO^2 dégagé dans le dédoublement...	$0^{gr},432$	$1^{gr},465$
		Par oxydation en deux temps des $0^{gr},367$ de graisse issus du dédoublement...........	$1^{gr},033$	
		Différence..............		$0^{gr},002$

B. — *Balance de la chaleur produite dans les deux modes de l'utilisation du glycose.*

Chaleur produite dans l'utilisation de 1 gr. de glycose..............	1° Par combustion directe......	$3^{cal},692$
	2° Par combustion en deux temps des $0^{gr},367$ de graisse issus du dédoublement.........	$3^{cal},458$
	Différence..................	$0^{cal},234$

En résumé, l'oxydation directe du sucre et l'oxydation après dédoublement de ce même sucre réclament la même quantité d'oxygène et produisent la même quantité de CO^2. D'autre part, les deux opérations produisent sensiblement la même quantité de chaleur, car le déficit constaté dans la deuxième est compensé par la chaleur dégagée au moment du dédoublement.

L'élaboration de l'albumine va donner lieu aux mêmes constatations. Le dédoublement de ce principe immédiat peut s'exprimer par l'équation suivante de M. A. Gautier :

$C^{72}H^{112}Az^{18}O^{22}S$.......	(1612)	=	$9(COAz^2H^4)$.. ..... . Urée.	(540)
$+ 14 H^2O$..............	(252)		$+ C^{51}H^{98}O^6$......... Tripalmiture.	(806)
Total..........	1864		$+ C^3H^6O^3$.......... Acide lactique.	90
			$+ 9 CO^2$............	396
			$+ S$...............	32
			Total égal.......	1864

D'où on tire que :

1 gramme d'albumine produit.....	$0^{gr},335$ d'urée.
	$0^{gr},50$ de graisse.
	$0^{gr},055$ d'acide lactique.
	$0^{gr},246$ de CO^2.

Le processus se termine ensuite par l'oxydation de la graisse en deux temps, c'est-à-dire par la production et la dépense du glycose. Faisons maintenant le bilan de la chaleur et des échanges gazeux dans les deux modes d'utilisation de l'albumine :

A. — *Bilan des échanges gazeux dans les deux modes de l'utilisation de l'albumine.*

I Oxygène consommé dans l'utilisation de 1 gramme d'albumine...............	1° Par oxydation directe jusqu'à l'urée............			$1^{gr},52$
	2° Par dédoublement......	Oxydation en deux temps des $0^{gr},50$ de graisse issus du dédoublement.	$1^{gr},460$	$1^{gr},526$
		Oxydation des $0^{gr},055$ d'acide lactique issus du dédoublement.....	$0^{gr},066$	

II CO^2 produit dans l'utilisation de 1 gramme d'albumine...	1° Par oxydation directe jusqu'à l'urée............			1gr,72
	2° Par dédoublement......	CO^2 dégagé dans le dédoublement.......	0gr,246	1gr,734
		Dans l'oxydation des 0gr,50 de graisse....	1gr,408	
		Dans l'oxydation des 0gr,055 d'ac. lactique.	0gr,080	

Les deux processus ont donc la même expression dans la respiration. Il ne nous reste plus qu'à faire le bilan de la chaleur :

B. — *Bilan de la chaleur produite dans les deux modes de l'utilisation de l'albumine.*

Chaleur produite dans l'utilisation de 1 gr. d'albumine....	1° Par oxydation directe jusqu'à l'urée......................			4cal,860
	2° Par dédoublement.....	Combustion des 0gr,50 de graisse issus du dédoublement.......	4cal,7115	4cal,813
		Combustion des 0gr,055 d'acide lactique..................	0cal,1015	

Ici encore l'écart est insignifiant.

On voit donc que l'intervention des phénomènes anaérobies qui président au renouvellement du potentiel glycose n'a pas d'expression sensible. Tout se passe comme si ces phénomènes n'avaient pas lieu, et ils n'apportent aucun changement grave ni dans la quantité de chaleur ni dans le volume des gaz attachés a la combustion pure et simple des principes immédiats. La combustion après dédoublement de ces principes a les mêmes effets extérieurs que la combustion directe.

Les résultats de nos expériences sont donc d'accord avec les théories que l'on peut émettre sur la constitution des réserves de potentiel par voie de dédoublement, mais il faut distinguer plusieurs cas.

On voit, en somme, que l'utilisation complète des aliments comporte deux phases : la production et la dépense des réserves. Or, on peut admettre que chez un animal en parfait équilibre de poids et de nutrition, les deux opérations sont contemporaines et complémentaires, c'est-à-dire que les réserves se dépensent au fur et à mesure de leur production. Dans ce cas, la production des réserves par voie de dédoublement ne trouble pas le rapport de la chaleur produite à l'oxygène consommé dans la combustion des aliments, et la théorie de la combustion est satisfaite par les résultats obtenus dans la mesure de la thermogenèse et des échanges gazeux. C'est ce qui est arrivé chez nos animaux d'expérience qui recevaient une ration suffisante pour les entretenir.

Quand l'alimentation est insuffisante, la dépense trouve son supplément dans les réserves antérieures de graisse, et ce supplément subit une oxydation complète en deux phases. D'autre part, les aliments composant la ration insuffisante subissent une élaboration complète entièrement équivalente par l'expression extérieure à une combustion directe. Ici encore, la théorie de la combustion est satisfaite.

Si l'alimentation excède les besoins de l'animal, la production des réserves l'emporte sur leur dépense et l'excès s'accumule, soit sous forme de graisse, soit sous forme de glycogène. Mais le seul trouble qui puisse survenir ici dans

l'expression thermique et respiratoire de la nutrition, porte exclusivement sur le dégagement du CO^2 et il est facile de s'en rendre compte. La ration de l'animal comporte deux parts : 1° une part qui est utilisée jusqu'aux derniers termes de sa destruction et pour laquelle, par conséquent, la théorie de la combustion est satisfaite ; 2° une part dont l'élaboration s'arrête à la formation des réserves par dédoublement. Or, le seul effet extérieur de ce dédoublement est de jeter dans la respiration un volume indéterminé de CO^2 étranger à la combustion. Le quotient respiratoire est donc altéré et cesse d'être conforme à la théorie de la combustion. Il n'en est plus de même de la chaleur produite et de l'oxygène consommé qui se rattachent entièrement à la combustion complète de la part utile de la ration. La théorie de la combustion est donc satisfaite en ce sens que la chaleur produite et l'oxygène consommé sont liés par le rapport qui dépend exclusivement de la composition des aliments et de leur combustion. On peut donc admettre que la chaleur produite par les animaux est sensiblement égale à celle qui résulterait de la combustion de leurs aliments.

Le moment est venu de rappeler les recherches de M. Kaufmann (*Archives de physiologie*, 1896). Nous venons de voir que dans les conditions de l'alimentation normale, ou de l'inanition, les phénomènes anaérobies n'ont pas d'expression sensible. Ils sont comme s'ils n'étaient pas. Par là même, les équations qui les expriment ou les équations analogues qui pourraient les exprimer, échappent à toute vérification. Or, M. Kaufmann a entrepris le contrôle de toutes les équations adoptées par M. Chauveau dans les théories générales de la nutrition, en les confrontant avec les résultats fournis par la mesure de la chaleur produite, des échanges gazeux de la respiration et de l'excrétion azotée. Toutes ces formules se sont trouvées exactes, et il ne pouvait en être autrement. Si nous ne nous abusons, M. Kaufmann n'a obtenu qu'une apparence de vérification, puisque l'hypothèse de la combustion directe s'accorderait aussi bien avec les résultats qu'il a obtenus. Par là même, et c'est l'intérêt considérable des recherches de M. Kaufmann, ces résultats établissent une fois encore, et par une autre voie, la neutralité des phénomènes anaérobies.

On comprendra maintenant pourquoi il ne nous est pas possible d'adopter les vues émises par M. Gautier sur l'importance thermogène de ces mêmes phénomènes anaérobies. L'éminent chimiste leur attribue le cinquième de la chaleur totale, et il invoque à l'appui de cette attribution si précise un argument au moins inattendu. M. A. Gautier s'appuie sur ce fait que l'oxygène des excreta, y compris celui de l'acide carbonique, excéderait de 1/5 l'oxygène dépensé dans la respiration, et il fait procéder cet excédent des phénomènes anaérobies qui trouvent là leur mesure et par corrélation celle de la chaleur qu'ils produisent. A moins que nous ne nous soyons mépris sur cet argument, il n'a pas la signification que lui donne son auteur. Assurément, l'oxygène des excreta excède l'oxygène inspiré et il serait même facile de montrer que la valeur de cet excédent est bien supérieure à la proportion indiquée par M. Gautier. Mais si tout l'oxygène excrété n'a pas pénétré avec la respiration, c'est qu'il a pénétré avec l'alimentation, et il est tout naturel que cette

dernière part se retrouve. En un mot, l'excédent retenu par M. Gautier représente l'oxygène de constitution des ingesta et n'a aucun lien avec les phénomènes anaérobies.

Dans une étude récente de chimie biologique (*Revue scientifique*, 1897), M. Berthelot passe en revue tous les corps qui pourraient dériver de la graisse ou des hydrates de carbone, au cours de leurs transformations dans l'organisme, et il montre que l'oxygène produit des quantités fort inégales de chaleur, en brûlant ces différents corps. Il en infère que la chaleur produite a des sources très inégales et ne peut pas être déduite, ni à partir du comburant, ni à partir du combustible. Ce que nous savons bien, grâce à M. Berthelot lui-même, c'est que les formes transitoires revêtues par les principes immédiats au cours de leur destruction ne signifient rien, et qu'il faut considérer exclusivement l'état initial et l'état final de ces principes. Or, la graisse et les hydrates de carbone sont vides de toute énergie quand ils abandonnent l'organisme, puisqu'ils en sortent à l'état d'eau et de CO^2. Le problème n'est pas d'imaginer ce qui pourrait arriver dans un monde vivant hypothétique, mais d'enregistrer ce qui est. Or, la réalité est que, *dans l'inanition ou dans les conditions d'une alimentation normale, la chaleur produite par un animal est sensiblement égale à la chaleur calculée à partir de l'oxygène consommé par cet animal, dans le même temps.*

En se reportant au tableau de la page 902, on constate que les chiffres qui mesurent le pouvoir thermogène de l'oxygène dans la combustion des différents principes immédiats s'éloignent très peu les uns des autres. L'écart qui sépare le plus grand (4,979, amidon), du plus petit (4,576, albumine) n'atteint pas 1/10. Si l'on réfléchit, d'ailleurs, que ces derniers chiffres répondent à des circonstances extrêmes de l'alimentation, qui ne sont jamais réalisés, et que l'aliment complet contient les trois catégories de principes immédiats, on arrive à constater que la valeur réelle du pouvoir thermogène de l'oxygène est comprise entre les valeurs extrêmes qui viennent d'être rappelées. Dans la réalité pratique, le rapport de la chaleur produite à l'oxygène consommé subit donc des variations atteignant au plus 1/20, et c'est dans ce sens et dans cette limite qu'on peut soutenir que la production de la chaleur est proportionnelle à l'oxygène consommé.

Dans nos recherches antérieures sur les variations corrélatives de l'intensité des combustions respiratoires et de la thermogenèse (*Comptes rendus de l'Académie des sciences*, mars 1895), nous avons obtenu des résultats parfaitement d'accord avec ces indications de la théorie, et nous avons vu que la consommation de l'oxygène et la production de la chaleur obéissent sensiblement à la même loi.

Dès lors, l'oxygène dépensé dans la respiration des animaux peut être pratiquement considéré comme le témoin le plus prochain, le plus aisément accessible, et nous dirions volontiers le plus exact, de l'énergie transformée dans l'organisme. Il suffit de l'affecter d'un coefficient moyen compris entre les valeurs extrêmes du pouvoir thermogène, et égal à la moyenne de ces valeurs, soit $4^{cal},775$ par litre d'oxygène, à 0° et à 760 millimètres.

CHAPITRE IV

INTENSITÉ DE LA THERMOGENÈSE

L'intensité de la thermogenèse a pour mesure la quantité de chaleur produite par kilogramme d'animal et par heure. C'est le *coefficient thermique*. Les quantités correspondantes d'oxygène consommé et d'acide carbonique produit, constituent les *coefficients respiratoires*, et il faut distinguer le coefficient respiratoire en oxygène et le coefficient respiratoire en CO^2. Il y a le plus grand avantage à les exprimer en volume, parce qu'on peut en inférer par un calcul rapide la valeur du quotient respiratoire, dont les indications sont si précieuses. Les trois coefficients ainsi définis constituent la seule expression légitime de l'intensité des phénomènes qu'ils représentent. Ils résument la presque totalité des actions physico-chimiques qui s'accomplissent dans l'organisme. Par là même ils traduisent fidèlement l'intensité du mouvement d'énergie dont ces actions sont à la fois la source et le dénouement final. Ils deviennent ainsi la caractéristique de ce mouvement et, pour tout dire, de l'intensité de la vie elle-même et des conditions qui la dominent ou la sollicitent. Pour ces raisons, les trois coefficients pourraient être embrassés dans l'expression générique de *caractéristiques biologiques*. Si leur emploi se généralisait, ce qui est fort désirable, les auteurs y gagneraient d'obtenir une précieuse unité de langage, qui donnerait plus de clarté et plus d'intérêt à leurs travaux.

Méthodes de calorimétrie. — La mesure de la chaleur animale peut être poursuivie par deux ordres de méthodes : les méthodes indirectes ou calorimétrie chimique, et les méthodes directes ou physiques réclamant l'emploi d'un calorimètre.

Les premières se justifient par l'ensemble des considérations qui ont été présentées sur les sources de la chaleur animale, et il serait aisé de montrer comment il est possible de calculer exactement la chaleur produite par un animal à partir de ses combustions respiratoires ou de ses excreta. Il suffit de connaître la mesure de l'oxygène consommé et de l'acide carbonique produit. A l'aide de ces deux éléments, on peut calculer la chaleur produite sur les bases déjà exposées ci-dessus. A la manière de Rubner on peut encore partir du CO^2 et de l'azote total des urines. Enfin, si, à l'exemple de Kaufmann, on détermine la mesure des échanges respiratoires et de l'azote total, le calcul trouve des bases irréprochables. Nous ne nous arrêterons pas sur les objections dirigées contre la calorimétrie chimique ; si fortes ou si faibles qu'elles soient, elles laissent hors de doute l'importance et la nécessité des méthodes directes. Celles-ci apportent tout au moins des résultats immédiats, dont quelques-uns échapperaient à la calorimétrie chimique quand ils sont le produit de conditions exceptionnelles ou pathologiques. Mais il faut insister sur ce point, que la mesure de la chaleur animale perd une grande partie de son intérêt quand elle n'est pas associée à la détermination des échanges gazeux de la respiration.

Le problème à résoudre est d'ailleurs un des plus difficiles et des plus délicats de la technique physiologique. Il est examiné ailleurs, dans cet ouvrage, et nous n'avons pas à l'aborder ici.

De la thermogenèse normale dans la série animale. — Nous sommes obligés de recourir sur ce point à la calorimétrie chimique, car l'emploi des calorimètres directs est resté circonscrit, dans les laboratoires, à quelques espèces animales. Nous prendrons comme témoin de la thermogenèse l'intensité des combustions mesurée à la consommation d'oxygène. Sur ce point, les documents abondent, et nous avons montré ailleurs comment le pouvoir thermogène de l'oxygène est assez constant pour servir de base à des calculs suffisamment approchés, si l'on prend pour base de calcul la valeur moyenne de ce rapport : soit le chiffre $4^{cal},775$. Nous donnons ci-dessous les chiffres afférents à toutes les espèces pour lesquelles on connaît la valeur moyenne du coefficient respiratoire.

Intensité des combustions normales et de la thermogenèse.

Espèces.	Coefficient respiratoire en oxygène. litres.	Coefficient thermique. calories.
Homme	0,300 (Vierordt).	1,432
Lapin	0,687 (Pflüger).	3,274
Chien	0,900 (Regnault et Reiset).	4,290
Cheval	0,250 (Zuntz).	1,193
Veau Porc	0,300 à 0,350 (Regnault et Reiset).	1,549
Cobaye	1,110 (Colasanti).	5,291
Petits oiseaux chanteurs	9 à 10 » —	45,288
Moineau	6,710 —	31,987
Poulet	0,750 à 1 » (Regnault et Reiset).	4,171
Marmotte en hibernation	0,030 —	0,143
Grenouille	0,044 à 0,074 —	0,275
Lézard	0,134 —	0,638
Anguille	0,048 (Jolyet et Regnard).	0,228
Raie	0,047 —	0,223
Crabe	0,107 —	0,507
Écrevisse	0,038 —	0,180
Hanneton	0,700 (Regnault et Reiset).	3,337
Ver à soie	0,600 à 0,800 —	3,307
Huître	0,013 (Jolyet et Regnard).	0,063
Lombric	0,060 —	0,333
Sangsue	0,022 —	0,104
Astérie	0,032 —	0,152

Influence de l'espèce. — Ce tableau fait immédiatement ressortir l'influence de l'espèce des animaux et de leur place dans l'échelle zoologique sur l'intensité de la thermogenèse. L'infériorité des animaux à sang froid s'y accuse d'une manière très remarquable ; l'huître, par exemple, qui est au bas de la série, fait 700 fois moins de chaleur qu'un rossignol. En revanche, certains articulés, comme le hanneton ou le ver à soie, se placent à côté du lapin. Mais de toutes les influences que le tableau précédent met en relief, il en est une qu'il faut retenir d'une manière particulière : c'est celle de la taille.

Influence de la taille. — En restant dans le même groupe d'animaux, on voit en effet que l'intensité des combustions et de la thermogenèse subit

des variations inverses de celles de la taille. 1 kilogramme de cochon d'Inde produit quatre ou cinq fois plus de chaleur que 1 kilogramme de cheval; 1 kilogramme de petits oiseaux en produit huit fois plus que 1 kilogramme de cochon d'Inde et dix fois plus que 1 kilogramme de poulet. L'influence de la taille se manifeste avec la même clarté sur les individus de la même espèce. D'après Richet, qui a fait toutes ses déterminations à l'aide de son calorimètre à siphon, le coefficient thermique atteint huit à dix calories chez des lapins de 200 grammes, et tombe à $2^{cal},690$ chez des lapins de $3^{kg},400$ à $3^{kg},800$. On n'a pas de renseignements sur la mesure de la thermogenèse chez les chiens de taille inégale. Dans la série publiée par Senator, sur cette espèce animale, l'influence de la taille se dessine, en effet, très imparfaitement, en raison de la faible inégalité de poids des animaux observés. D'après Richet, le coefficient thermique est de $3^{cal},180$ chez un chien de 11 kilogrammes, et il s'élève à $5^{cal},976$ chez des chiens de petite taille. Si l'on prend les combustions comme témoin de la thermogenèse, on peut consulter un grand nombre de documents qui déposent dans le même sens. Nous nous bornerons à ceux que Richet a recueillis (*Travaux du Laboratoire*, 1893, t. I, p. 533), en ne retenant d'ailleurs que les faits extrêmes de la longue série présentée par l'auteur. Un chien de 28 kilogrammes produit $0^{lit},461$ de CO^2 par kilogramme et par heure, tandis qu'un chien de $2^{kg},200$ en produit $1^{lit},818$. D'après nos propres observations, le coefficient respiratoire en oxygène varie de $0^{lit},300$ à $0^{lit},400$ chez les chiens de grande taille (15 à 20 kilogrammes) et de $0^{lit},600$ à $1^{lit},000$ chez les chiens de 3 à 5 kilogrammes.

La direction de ces phénomènes a sa raison dans une relation géométrique très simple : Les deux facteurs qui pèsent immédiatement sur la mesure de la calorification sont la surface et le poids du corps. La surface donne sa mesure au rayonnement calorifique et par conséquent à la production compensatrice de chaleur. D'une manière générale, et toutes choses étant égales, la valeur absolue de la thermogenèse est donc proportionnelle à la surface du corps. Mais, pour obtenir l'intensité de ce phénomène, il faut rapprocher sa valeur absolue de l'unité de poids et la diviser par le poids de l'animal. L'intensité de la calorification est donc fonction d'un rapport où la surface est un numérateur, tandis que le poids est un dénominateur :

$$I = K \times \frac{S}{P}.$$

Sous une autre forme, elle est directement proportionnelle à la surface et inversement proportionnelle au poids du corps. Or, la surface croît proportionnellement au carré des dimensions linéaires, comme la taille, tandis que le poids varie, comme le volume, proportionnellement au cube de ces mêmes dimensions. Si donc on suppose une série d'animaux dont la taille va croissant, le rapport, $\frac{S}{P}$ qui tient sous sa dépendance l'intensité de la thermogenèse, va, au contraire, en décroissant, pour ce seul motif que le dénominateur P marche plus vite que le numérateur S.

C'est ce qu'on exprime en disant que les petits animaux ont, par rapport à leur poids, une surface plus grande que les animaux de taille plus élevée.

Si on exprime la surface S et le poids ou volume P, en fonction de la taille faite égale à r, la formule ci-dessus devient $I = K\frac{r^2}{r^3} = K \times \frac{1}{r}$. A ne considérer que la géométrie, l'intensité de la thermogenèse devrait donc être, en toute rigueur, inversement proportionnelle à la taille ; mais les choses de la vie n'ont pas cette précision, et nous devons nous borner à constater simplement que l'intensité de la thermogenèse suit une marche inverse à celle de la taille.

De même encore, si on ne considère que la géométrie ou la physique, l'intensité de la thermogenèse devrait être, en toute rigueur, proportionnelle à la surface. Par l'influence qu'elle exerce sur le rayonnement calorifique, la surface réglerait l'intensité de tous les phénomènes chimiques de la vie et par conséquent de la thermogenèse. Il n'y aurait donc plus qu'à établir la formule qui, au moyen de données empiriques, permettrait de mesurer la surface d'un animal. Cette mesure a été poursuivie par divers auteurs (Rameaux, Rubner, et Meeh). On admet, en général, la formule proposée par ce dernier physiologiste : $S = K\sqrt[3]{P^2}$ dans laquelle K est une constante déterminée empiriquement une fois pour toutes. Cette constante serait égale à 11,2. On peut donc rechercher si véritablement la loi de la surface a toute la précision géométrique voulue par la théorie. C'est ce que Richet et Hanriot ont tenté dans un grand nombre de déterminations expérimentales, portant sur la production du CO^2 et, pour donner à leurs résultats toute leur clarté, ils les ont exprimés en les ramenant à l'unité de surface, le mètre carré. Ils obtiennent, de cette manière, ce qu'on pourrait appeler le coefficient respiratoire superficiel, c'est-à-dire la quantité de CO^2 produite, dans chaque espèce, par heure et par mètre carré d'animal.

Si la géométrie devait prévaloir, ce coefficient aurait la même valeur chez tous les animaux. Il est loin d'en être ainsi, comme on en peut juger par les chiffres suivants empruntés à Hanriot et Richet :

Espèces.	Poids.	Quantité de CO^2 produit en 1 heure par mètre carré.
	Kil.	Gr.
Bœufs	500	3,70
Moutons	70	2,25
Hommes	60	2
Oies	3	1,85
Poules	1,700	1,72
Chats	2	1,48
Lapins	2	1,34
Marmottes	1	1,07
Pigeons et tourterelles	0,300	1

En présence de ces chiffres si différents les uns des autres, il nous est impossible de conclure, avec les auteurs à qui nous les devons, que l'intensité de la thermogenèse mesurée au CO^2 est proportionnelle à la surface. C'est qu'en réalité la surface n'est qu'un des nombreux facteurs qui pèsent sur la ther-

mogenèse, et son influence se combine avec celle d'un grand nombre d'autres conditions qui vont être examinées.

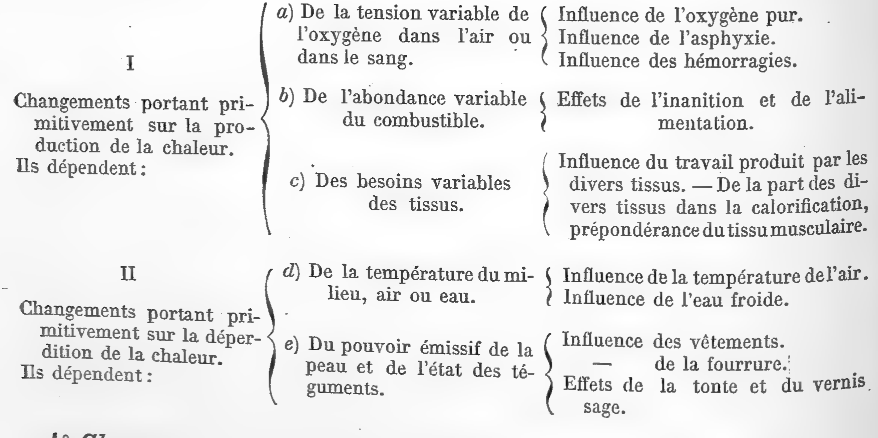
Cette réserve étant faite, il reste fort intéressant de constater que dans les espèces très homogènes, comme l'homme, la chaleur produite par des sujets de taille inégale est proportionnelle à leur surface. Sous une autre forme, ils produisent la même quantité de chaleur par unité de surface. On en pourra juger par les résultats qui suivent et que Rubner a obtenus en calculant la chaleur produite à partir des dépenses réelles mesurées aux excreta :

		Dépense totale de calories.	Calories par kilogramme.	Surface en cent. carrés.	Calories par mètre carré.
Enfants de	4kg,03	368	91,3	3 013	1 221
—	11kg,8	966	81,5	7 151	1 343
—	16kg,4	1 213	73,9	7 681	1 579
—	23kg,7	1 411	59,5	10 156	1 389
—	40kg,4	2 106	52,1	19 491	1 452
Hommes de......	67kg,0	2 843	42,4	20 305	1 399

CHAPITRE V

VARIATIONS DE LA THERMOGENÈSE

Les faits contenus dans ce chapitre sont le développement et en quelque sorte l'illustration de la théorie précédemment exposée sur les sources de la chaleur animale. Ils montrent, en effet, une fois de plus, que les variations, d'ailleurs très étendues, de la thermogenèse sont placées sous la dépendance des variations corrélatives dans l'intensité des combustions. Ces variations peuvent atteindre primitivement l'un ou l'autre des deux termes de la calorification : la production ou la déperdition de la chaleur ; et c'est en partant de cette base qu'il convient de classer les divers changements pouvant survenir dans l'intensité de la thermogenèse. Nous les embrassons dans le tableau suivant :



I Changements portant primitivement sur la production de la chaleur. Ils dépendent :	*a*) De la tension variable de l'oxygène dans l'air ou dans le sang.	Influence de l'oxygène pur. Influence de l'asphyxie. Influence des hémorragies.
	b) De l'abondance variable du combustible.	Effets de l'inanition et de l'alimentation.
	c) Des besoins variables des tissus.	Influence du travail produit par les divers tissus. — De la part des divers tissus dans la calorification, prépondérance du tissu musculaire.
II Changements portant primitivement sur la déperdition de la chaleur. Ils dépendent :	*d*) De la température du milieu, air ou eau.	Influence de la température de l'air. Influence de l'eau froide.
	e) Du pouvoir émissif de la peau et de l'état des téguments.	Influence des vêtements. — de la fourrure. Effets de la tonte et du vernissage.

1° *Changements portant primitivement sur la production de la*

chaleur. — *a.* Influence de l'oxygène. — Chez les animaux placés dans l'oxygène pur, la respiration et la production de la chaleur conservent leur intensité accoutumée. Lavoisier avait déjà vu ce fait. Il a été constaté bien des fois depuis, et il prouve qu'à partir de la tension minima de l'oxygène suffisante pour l'accomplissement des échanges respiratoires, les tissus règlent l'intensité des combustions sur la mesure de leurs besoins.

b. Influence de l'asphyxie. Refroidissement mortel et transformation des animaux a sang chaud en animaux a sang froid, par privation d'oxygène. — Mais précisément, si la tension de l'oxygène tombe au-dessous de la valeur minima compatible avec l'exercice régulier de la respiration, les combustions s'affaiblissent, et avec elles la thermogenèse. Dans nos recherches sur les altérations de l'air dans l'asphyxie en vase clos, nous avons déterminé cette valeur et montré qu'elle est l'atmosphère comprise entre 13 ou 14 p. 100. Mais dans l'asphyxie en vase clos les troubles de la respiration vont en s'accentuant, et à mesure que les combustions trouvent un obstacle croissant, la production de la chaleur diminue de plus en plus (après une exacerbation passagère), au point de devenir inférieure à la dépense, en sorte que les animaux meurent refroidis de deux ou trois degrés, rarement davantage. On est donc là en présence d'un abaissement de la thermogenèse par privation d'oxygène. Mais dans les conditions de l'asphyxie en vase clos, les phénomènes ont une marche trop rapide pour laisser tous ses effets à l'insuffisance des combustions, et le refroidissement final de l'animal est peu considérable. Il en est autrement si l'on dispose les choses de manière à donner au confinement une durée indéfinie, c'est-à-dire si l'on place les animaux dans des conditions leur permettant de séjourner dans une atmosphère de composition constante et très pauvre en oxygène. Rien n'est plus facile. Il suffit d'établir dans l'enceinte qui contient l'animal une ventilation *insuffisante, mais continue et rigoureusement uniforme.* C'est ce que nous avons fait dans des expériences inédites portant sur le lapin, et dans lesquelles le courant d'air chargé de renouveler l'atmosphère a varié, entre 3 et 7 litres par heure. Dans ces conditions de ventilation faible et uniforme, l'atmosphère se renouvelle lentement, et ses altérations, rapidement croissantes, s'arrêtent à une valeur définie qui est à la fois fonction de la consommation d'oxygène et de son renouvellement. L'animal vit ainsi dans une atmosphère de composition invariable, mais trop pauvre en oxygène pour entretenir les combustions au degré normal. Mais si ces combustions sont insuffisantes pour entretenir la production de la chaleur au degré qui convient, elles permettent à l'animal de vivre assez longtemps pour perdre beaucoup de chaleur et se refroidir profondément. Il ne meurt pas asphyxié, il meurt de froid. Le défaut d'espace ne nous permet pas de décrire en détail toutes nos expériences, qui sont au nombre de quatorze. Disons seulement que nos animaux ont été placés de manière à vivre dans des atmosphères ne contenant que de 4 à 6 p. 100 d'oxygène, et que dans ces conditions leur température est descendue à 30° en moyenne, et par exception au-dessous. Le minimum observé a été 24°,8. En résumé, par l'abaissement méthodique des combustions on peut arriver à refroidir profondément les animaux sans les asphyxier. Les uns se refroidissent jusqu'aux limites

de la température incompatible avec la vie et meurent de froid. Les autres dénivellent leur température et s'efforcent de l'ajuster aux ressources d'oxygène dont ils disposent.

Il y avait le plus grand intérêt à rechercher si, en pareil cas, la chaleur produite trouve son origine exclusive et sa mesure dans les combustions, et si l'intensité de la thermogenèse reste proportionnelle à la consommation diminuée de l'oxygène. Conformément aux principes exposés plus haut, il fallait rechercher si la chaleur réellement produite reste égale à la chaleur calculée à partir de l'oxygène consommé et de son pouvoir thermogène. A cet effet, nous avons institué trois expériences dont la durée a été de quinze et dix-huit heures. Les animaux séjournaient dans une atmosphère contenant 5 à 6 p. 100 d'oxygène, et 12 à 13 p. 100 de CO^2. Ils ont subi un refroidissement de 10°,6, 9°,3 et 10°,7. L'intensité de la thermogenèse a subi une chute de 50 p. 100 environ, mais elle est restée liée à l'oxygène consommé par le rapport exigé par la théorie de la combustion. La totalité de la chaleur calculée pour les trois expériences a été de $188^{cal},872$, et celle de la chaleur réelle s'est élevée à $188^{cal},996$, soit un écart inférieur à 0,001. Il n'est pas possible de trouver une concordance plus soutenue et plus démonstrative que dans cette série de faits dont nous nous bornons à totaliser les résultats.

Influence des hémorragies. — Les hémorragies abondantes ont toujours pour effet de diminuer l'intensité des combustions et de la thermogenèse. On sait même que dans les cas graves la production de la chaleur diminue au point qu'elle cesse de compenser les effets de la déperdition. Il en résulte un abaissement plus ou moins menaçant de la température centrale sur le malade ou l'animal sujet de l'expérience. C'est ainsi que sous l'influence de saignées abondantes pratiquées sur le chien, Marschall-Hall a vu tomber la température rectale de ces animaux à 29°,45 et à 31°,5. Ici comme dans les faits examinés au précédent paragraphe, l'abaissement des combustions et de la thermogenèse est dû à l'insuffisance de l'oxygène dont disposent les tissus. Dans une expérience instituée sur un chien de $2^{kg},875$ et à qui nous avions enlevé 100 grammes de sang artériel, la température est tombée seulement de 39°,1 à 38°; mais le coefficient thermique, qui à l'état normal était de $4^{cal},200$, est descendu à $2^{cal},700$, soit une réduction de un tiers. D'ailleurs, l'oxygène consommé rendait compte de la chaleur produite, à 0,003 près.

Influence de l'inanition et de l'alimentation. — On peut admettre d'une manière générale, que chez les animaux en pleine inanition les caractéristiques biologiques (coefficients respiratoires et thermique) conservent sensiblement la même valeur jusqu'à la période agonique de l'inanition. En un mot, l'intensité des phénomènes physico-chimiques de la vie conserve une valeur uniforme, c'est-à-dire que les dépenses chimiques de l'animal et sa production thermique diminuent proportionnellement au poids. Il y a dans la vie des inanitiés bien des irrégularités qui viennent altérer la pureté et la simplicité de cette loi. Mais, d'une manière générale, on peut la tenir pour exacte, surtout chez le chien. Il résulterait de nos propres expériences que, chez les animaux à jeun, l'intensité des combustions respiratoires et de la thermo-

genèse subit une réduction inférieure à 0,159; on en pourra juger par les valeurs du coefficient thermique que nous avons observées sur différentes espèces, chez l'animal alimenté et chez l'animal à jeun :

		Cobaye.	Lapin.	Canard.	Chien.
Intensité de la thermogenèse (coefficients thermiques)........	Chez l'animal à jeun...	3^{cal},800	2^{cal},875	4^{cal},752	2^{cal},975
	Chez l'animal alimenté..	4^{cal},100	3^{cal},237	5^{cal},533	3^{cal},760
	Accroissement.........	0,078	0,125	0,164	0,269
	Moyenne de l'accroissement............		0,159		

On voit que l'alimentation aurait des effets inégaux sur les différentes espèces, mais qu'en moyenne elle entraîne un excédent de dépenses atteignant 16 p. 100 environ. On a coutume d'attribuer cet excédent aux effets du travail digestif, et on en conclut que les dépenses d'un animal à jeun évaluées soit aux combustions respiratoires, soit à l'intensité du rayonnement calorifique, donnent la mesure des besoins alimentaires de cet animal. A l'appui de cette manière de voir, von Mering et Zuntz invoquent les résultats qu'ils ont obtenus sur le lapin par des injections alimentaires intraveineuses. Quand les injections sont poussées avec lenteur, elles n'accroissent pas l'intensité des combustions.

Nous croyons pourtant que dans l'accroissement de dépense attaché à l'alimentation, il faut faire une part à l'influence directe exercée par le milieu interne modifié par la pénétration des principes immédiats. Nos recherches sur l'utilisation immédiate des hydrates de carbone (*Archives de physiologie*, 1896) nous ont montré en effet que dès l'administration d'un repas formé d'hydrates de carbone (pain, soupe au lait, sucre), l'animal consomme du sucre, et en consomme de grandes quantités.

La combustion du glycose, dénoncée par l'exagération des combustions et par l'élévation du quotient respiratoire, paraît marcher parallèlement au débit de l'absorption intestinale, et dépendre immédiatement du taux du glycose dans le sang. Nous croyons devoir réunir ici les résultats que nous avons obtenus sur un chien de 17 kilogrammes soumis à des rations variables de pain ou de sucre de canne :

Ration.	200 grammes de pain.	450 grammes de pain.	200 grammes de sucre.	400 grammes de sucre.	600 grammes de sucre.
Accroissement des combustions, deux heures après le repas...	33 p. 100	39 p. 100	47 p. 100	57 p. 100	102 p. 100

L'intensité des combustions semble donc dépendre de la diffusibilité, de la digestibilité et de l'abondance de l'aliment ingéré.

Aussi bien, les effets de l'alimentation survivent à ceux de la digestion, car il faut plus de vingt-quatre heures pour épuiser les réserves alimentaires du dernier repas. Sur un chien de 3^{kg},430 et soumis au régime azoté, le coefficient respiratoire a une valeur de 0^{lit},712 vingt-quatre heures après le repas, et de 0^{l}655 quarante-huit heures après. Dans les douze heures qui suivent l'ingestion de la ration, et alors que la digestion peut être considérée comme achevée, le coefficient prend une valeur de 0^{lit},751 pour 100 grammes de

viande, 0,783 pour 200 grammes, et de 0,787 pour 300 grammes. On peut en inférer légitimement que l'abondance du combustible augmente l'intensité des combustions et de la thermogenèse. Les tissus sont donc sensibles aux changements subis par le milieu interne, sous l'influence des aliments.

Changements dépendant des besoins des tissus. — Influence du travail. — *Travail musculaire.* — L'activité des tissus est une occasion de dépense chimique, et par conséquent de production de chaleur. D'une manière générale, on peut donc poser cette loi que l'intensité de la thermogenèse s'accroît sous l'influence du travail. Cet accroissement est surtout manifeste dans le travail musculaire, et c'est de ce côté que nous allons d'abord l'examiner. Il trouve une première expression, soit dans l'élévation de la température centrale pendant le travail, soit dans l'échauffement des muscles eux-mêmes. On a sur ces points un grand nombre de documents devenus classiques.

Davy a vu que, sous l'influence de l'exercice normal, le thermomètre axillaire s'élève de 36°,6 à 37°,25 et même à 37°,50. L'hyperthermie s'exagère encore après un exercice violent. Le coureur observé par Wunderlich avait à la fin de l'épreuve une température de 39°,5. Les chiens qui se débattent dans leurs liens sur la table de vivisection s'échauffent notablement. Richet a vu dans ces conditions la température d'un chien s'élever de 38° à 41°. Mais pour donner tout son excès à l'hyperthermie d'origine musculaire, il faut provoquer artificiellement des contractions généralisées, à l'aide des excitations électriques. Les effets du tétanos électrique ont surtout été étudiés par Richet, sur le chien. En réglant comme il convient le rythme, l'intensité et la durée des contractions électriques, on détermine infailliblement une élévation croissante de la température qui peut atteindre 44°, 44°,5 et même 45°. Mais, en général, les animaux succombent avant ce dernier terme, et meurent dès que leur température centrale atteint 44°. Nous aurons plus tard à préciser la cause de la mort par la chaleur. En regard de l'hyperthermie provoquée par le tétanos électrique, doivent figurer les élévations de température qui se produisent également dans les maladies convulsivantes, et pour la même raison. Telles sont l'épilepsie, la chorée, le tétanos. Dans une observation restée fameuse, Wunderlich a vu la température d'un tétanique atteindre 44°,75.

Chez les animaux à sang froid, ces phénomènes acquièrent une très grande intensité, en raison de la faible valeur de la température initiale et de l'absence de toute régulation. Nous citerons notamment les observations de Réaumur qui a constaté une température de 37° dans une ruche d'abeilles en pleine agitation ; celles de Girard qui, à l'aide de très délicats explorateurs thermo-électriques, a vu la température des muscles de la masse thoracique atteindre 32° et même 37°, chez le sphinx du troëne, pendant le vol. Dans les expériences de M. Lecoq, la température du même animal s'est élevée sous la même influence jusqu'à 40°. Il est intéressant de constater que l'exploration thermique est ici dirigée sur les muscles en activité et porte sur le foyer même de la calorification exceptionnellement exagérée par l'exercice. Partout ailleurs, dans l'abdomen par exemple, la température est beaucoup plus

basse et reste inférieure de 10° et même de 15° à celle de la masse des muscles moteurs de l'aile. C'est donc bien dans les muscles que la chaleur est engendrée au moment et en raison de leurs contractions. Il est facile de s'en assurer sur les vertébrés. La première observation de ce genre appartient à Becquerel et Breschet, qui ont étudié le phénomène sur le biceps de l'homme à l'aide des appareils thermo-électriques. L'une des aiguilles du couple étant enfoncée dans la profondeur du muscle et l'autre étant laissée à demeure dans la bouche, l'aiguille du galvanomètre commence à se dévier dès les premières contractions du biceps, et elle accuse bientôt une élévation de température de 1 degré. Il suffit d'ailleurs, pour observer l'échauffement du biceps, sous l'influence de la contraction, de faire usage de thermomètres très sensibles, et de les appliquer sur la peau qui recouvre le biceps, en protégeant la région contre le refroidissement par une enveloppe ouatée (Béclard, Chauveau). Helmoltz, Heindenhain, Béclard et beaucoup d'autres, faisant usage d'appareils thermo-électriques extrêmement sensibles, ont également observé l'élévation de la température dans l'épaisseur du gastrocnémien de la grenouille; une seule secousse musculaire entraîne une déviation de 1 à $\frac{5}{1\,000}$ de degré (Heindenhain).

L'influence du travail spontané des muscles sur leur température offre un intérêt particulier en raison de la pureté des faits qui sont exclusifs de toute autre condition que celle du travail. Cl. Bernard place un thermomètre dans la veine faciale d'un cheval, à son embouchure sur la jugulaire, et il fait manger l'animal. Aussitôt le thermomètre accuse une élévation de température. Nous apprenons du même coup que les muscles s'échauffent en travaillant, et que la chaleur engendrée par la contraction est emportée par le sang et répartie dans tout l'organisme.

En regard et en opposition de l'hyperthermie liée à l'activité, se place l'hypothermie qui accompagne les divers modes de l'immobilité. Telle est l'immobilité du sommeil ou celle de l'hibernation. Dans ce dernier cas, le repos musculaire est aussi profond que possible; aussi la température des hibernants n'excède-t-elle que de quelques degrés seulement la température extérieure. Un loir observé par Hunter avait une température de 27°,5, le thermomètre de l'appartement marquant 17°,5. Par un froid très vif, un muscardin observé par Lortet avait une température centrale de 6°; mais il a suffi de réveiller l'animal pour voir sa température se relever rapidement et atteindre en quelques instants à 30°. Cl. Bernard a observé une marmotte dont la température dépassait de 3 degrés seulement celle du dehors.

Mais le repos profond des muscles peut être obtenu artificiellement; les lapins maintenus attachés sur la table de vivisection ne font plus aucun mouvement et se refroidissent de 2 ou 3 degrés (Legallois, Cl. Bernard, Richet). L'immobilité paralytique est beaucoup plus efficace. On peut l'obtenir, soit par la section de la moelle, soit par le curare (Cl. Bernard). Dans une expérience de ce dernier, un lapin à moelle sectionnée présenta, six heures après, une température de 24°. Pour être moins profonds, les effets de l'intoxication curarique ne sont pas moins démonstratifs.

Les changements de la température centrale déterminés par le travail musculaire dénoncent évidemment un trouble de la fonction régulatrice. Ce trouble apparaît avec clarté dans l'expérience suivante, instituée sur lui-même par Mosso. L'expérimentateur italien a parcouru 100 kilomètres en deux jours à raison de 50 kilomètres par jour. Sa température s'est élevée le premier jour à 37°,48 (température axillaire), et le second jour à 38°,13. On voit que la régulation était moins parfaite dans la seconde moitié de l'épreuve, et alors que le sujet était déjà fatigué par la longue marche de la veille.

Dans le même ordre de faits, on pourrait signaler l'accroissement de la température centrale observé sur eux-mêmes par un grand nombre d'expérimentateurs, au cours de l'ascension d'une montagne élevée. Il est vrai que sur ce point les observateurs sont en désaccord : les uns ont constaté un échauffement, et les autres un refroidissement pendant l'ascension. De là une véritable querelle : la querelle des ascensionnistes, dont le récit ne nous paraît pas devoir trouver place ici. Il nous suffira de dire que l'abaissement de la température centrale n'a été constaté que par les ascensionnistes qui se contentaient de prendre leur température buccale. Tous ceux au contraire qui se sont assujettis à se servir d'un thermomètre rectal, ont invariablement constaté une élévation de leur température centrale pendant l'ascension.

Mais l'hyperthermie due au travail ne constitue pas l'expression exacte de l'énergie transformée et de la chaleur produite. Cette expression ne se trouve que dans les changements apportés dans la nutrition des muscles et dans la thermogenèse pendant leur activité.

Sur le premier point, il nous suffira de rappeler les développements que nous avons consacrés à l'alimentation de l'énergie musculaire et, en général, au travail physiologique sous toutes ses formes. On a vu comment l'activité des tissus s'alimente et s'entretient dans une dépense de glycose dont la mesure se précise légitimement dans l'excès des combustions attachées à l'activité ; or, l'exagération des combustions qui accompagne le travail musculaire est de notion commune, et il est inutile de s'étendre sur ce point. Rappelons simplement les conclusions de Lavoisier et Séguin, de Prout, Scharling, Vierordt, Smith, Valentin, Ludwig, Hirn, Hanriot et Richet, etc. Il ressort de l'ensemble des faits recueillis par ces divers expérimentateurs, que, sous l'influence du travail musculaire, l'intensité des échanges gazeux de la respiration devient trois, quatre et même cinq fois plus considérable qu'au repos. Les recherches entreprises sur le cheval par Zuntz et Lehmann, à la Station agronomique de Berlin, ont donné des résultats plus saisissants encore (*Untersuchungen über den Stroffwechsel des Pferdes ber Ruhe mid Arbeit*, avec la collaboration de Hagemann, Parey. Berlin, 1889). Ces recherches ont été instituées en vue de déterminer la dépense chimique attachée au travail et de fixer la composition de la ration. Nous en détachons deux expériences :

		Expérience I.	Expérience II.
Valeur du coefficient respiratoire du cheval (O^2 consommé par heure et par kilog.).	Repos....	$0^{lit},209$	Id.
	Travail...	$1^{lit},911$	$1^{lit},791$

Il en résulte que les combustions respiratoires sont presque décuplées chez le cheval qui travaille.

Rappelons enfin que l'analyse des gaz du sang, dans les muscles envisagés tour à tour au repos et pendant leur activité, donne des résultats du même ordre témoignant de l'accroissement des combustions intramusculaires.

L'excès des combustions lié au travail suffirait à mesurer l'énergie transformée et la chaleur produite dans la contraction ; mais, si légitime que soit ce mode d'évaluation, il ne nous dispense pas de recourir aux moyens directs de la calorimétrie. Sur ce point, il existe peu de documents. La méthode *auto-calorimétrique* imaginée par M. Chauveau et appliquée au releveur de la lèvre supérieure est d'un emploi très laborieux et ses résultats intéressent surtout la thermodynamique. Les travaux de Hirn sont également consacrés à cette dernière question, et il serait inopportun d'en retenir, en ce moment, les résultats. Ce qui est intéressant pour l'étude de la thermogenèse musculaire, c'est de comparer la chaleur produite aux échanges gazeux de la respiration pendant le travail stérile. Dans ce cas, toute l'énergie transformée se résout en chaleur, et il devient possible de savoir si les combustions contemporaines en rendent exactement compte. Pour isoler purement les deux termes : la dépense chimique évaluée aux combustions, et l'énergie produite évaluée à la chaleur rayonnée, il suffit d'enfermer un animal dans un calorimètre disposé pour la mesure des échanges respiratoires, et de solliciter l'activité musculaire de cet animal par des excitations électriques convenablement rythmées. C'est ce que nous avons entrepris dans des recherches antérieures (*Biologie*, 1892 ; *C. R. Ac. sc.*, 1892), et l'ensemble de nos résultats nous a permis de conclure que la chaleur produite dans la contraction stérile des muscles est sensiblement proportionnelle à l'oxygène consommé. Mais ce résultat est insuffisant et, à l'aide des méthodes nouvelles dont nous disposons, nous nous proposons de rechercher si la chaleur produite dans la contraction stérile s'accorde avec la théorie de l'alimentation des muscles.

De la production de la chaleur dans le travail des tissus autres que les muscles.— Les transformations de l'énergie obéissent aux mêmes lois dans tous les tissus, et *à priori* nous pourrions conclure que dans tous les organes l'activité devient une source nouvelle de chaleur ; mais ici les phénomènes ont une intensité fort médiocre et ne se prêtent pas aux mesures calorimétriques. Il faut avoir le plus souvent recours à de simples mesures thermométriques. Disons brièvement les méthodes employées et les résultats obtenus sur les tissus nerveux et sur les glandes.

De l'échauffement des nerfs. — Pour saisir les faibles variations thermiques qui ont lieu sans doute sur les nerfs en activité, il est nécessaire d'user d'artifice. On opère sur les gros troncs nerveux offerts par les animaux à sang chaud ; mais pour obtenir des différences de température saisissables au moment de l'activité provoquée par l'excitation, on refroidit les animaux d'expérience, soit par la section de la moelle (Cl. Bernard), soit par l'immobilisation des sujets (Schiff). Ou bien encore, on utilise le refroidissement

spontané des hibernants (Helmoltz). Quant aux variations thermiques dues au travail du nerf exploré, elles sont déterminées à l'aide de la méthode thermo-électrique. Les piles du circuit ont la forme d'aiguilles, dont une est plongée dans un milieu à température fixe, tandis que l'autre est en rapport avec le nerf exploré et le plus loin possible du point excité. Helmoltz, opérant sur des animaux à sang froid, déclare n'avoir jamais observé une déviation galvanométrique au moment des excitations portées sur les nerfs. Schiff et Cl. Bernard ont obtenu quelques résultats positifs qu'il est difficile d'interpréter dans le sens d'un échauffement physiologique, car l'électricité, dont on se sert nécessairement pour produire les excitations, détermine dans le nerf des changements physiques capables d'influencer l'appareil de mesure. Aussi a-t-on substitué à la méthode thermo-électrique un nouvel appareil échappant à ces inconvénients et capable d'indiquer une production de chaleur (Rolleston, Steward, de Bœck). Cet instrument constitue le *bolomètre* ou thermomètre à résistance électrique. Il est fondé sur ce fait qu'un circuit métallique offre au passage du courant une résistance variable avec sa température. Ici le circuit est formé par un petit fil de platine isolé électriquement et enroulé sur un axe de mica ; le tout forme une masse très faible et atteignant 4 milligrammes. Ce circuit constitue l'instrument explorateur, et c'est lui qui est mis en relation intime avec le nerf. Il communique d'autre part avec l'un des bras d'un pont de Wheatstone dont l'autre bras communique avec un autre explorateur identique chargé de compenser les effets de la température extérieure. Or, en dépit de la sensibilité de ce thermomètre électrique qui peut donner jusqu'au 1/50000[e] de degré, les auteurs précités s'accordent à dire que l'activité des nerfs ne se manifeste par aucun échauffement sensible.

Échauffement des centres nerveux. — En ce qui touche la production de la chaleur dans les centres nerveux actifs, on peut, avec Schiff et Cl. Bernard, s'inspirer de ce fait que pendant le sommeil la circulation cérébrale est très sensiblement ralentie, et que le cerveau est dans un état d'anémie relative. Pendant la veille, cette anémie fait place à une congestion fonctionnelle où l'on peut voir le moyen et, par conséquent, l'expression des phénomènes physico-chimiques liés à l'activité. On n'a pas renoncé pourtant à surprendre l'échauffement cérébral d'une manière plus directe. Schiff s'est encore servi pour cet objet de la méthode thermo-électrique ; mais ses résultats ne permettent pas de conclure en un sens ou en l'autre. Gley, après John Davy et après Speck, a nettement établi l'influence de l'activité intellectuelle sur la température rectale, qui s'élèverait de 1/10 de degré après une heure de travail. Plus récemment, Mosso a essayé, sur le chien, de surprendre l'échauffement subi par le cerveau sous l'influence des phénomènes psychiques. Il opère sur un animal endormi par le laudanum et il place à demeure des thermomètres très sensibles, qui permettent d'explorer les changements de la température en différentes régions : le sang, le rectum, l'épaisseur des muscles et le cerveau dans la zone psychomotrice. Le sommeil artificiel fait tomber uniformément la température, qui en tous les points précités descend de 39° à 38°. Mais si on éveille la sensibilité de

l'animal de différentes manières : piqûres, bruits intenses à l'aide d'un porte-voix, appels d'une voix connue, toutes ces impressions portent exclusivement leur effet sur le thermomètre cérébral qui indique un relèvement de la température ; on obtient le même résultat si on excite la surface corticale à l'aide de courants induits.

Production de la chaleur dans les glandes. — L'influence thermogène du travail est plus facile à démontrer sur les glandes, et les premiers témoignages sont fournis par les changements subis par la circulation de ces organes quand ils entrent en activité. La circulation devient beaucoup plus active et le sang veineux qui sort de la glande est plus chaud que le sang artériel qui y pénètre (Cl. Bernard). La glande elle-même s'échauffe pendant la sécrétion. Ludwig avait déjà constaté que la salive fournie par la sous-maxillaire du chien, quand on excite la corde du tympan, a une température plus élevée que celle du sang artériel. De son côté, Morat, employant la méthode thermo-électrique, a pu constater directement que la sous-maxillaire s'échauffe quand on excite la corde du tympan. Pour éviter les causes d'erreur dues au déplacement de la chaleur par la circulation, celle-ci était supprimée dans la glande, par la ligature des gros troncs de la tête. Tous ces signes trahissent indubitablement une exagération de la thermogenèse, et par conséquent des combustions effectuées dans l'intimité des glandes au moment de la sécrétion. Sur ce dernier point, Cl. Bernard a commis une singulière méprise : l'illustre physiologiste avait été justement frappé des caractères présentés par le sang veineux qui sort des glandes en activité. Ce sang conserve les caractères du sang artériel et il reste rutilant. La rutilance du sang veineux des glandes au moment de la sécrétion se constate aisément sur les vaisseaux du rein, dont l'activité est incessante. De même, si, après avoir découvert la sous-maxillaire sur un chien, on excite la corde du tympan, ou plus simplement si on introduit des substances sapides dans la bouche de l'animal, la glande se congestionne et devient très rouge. L'analyse des gaz du sang donne des résultats tout à fait concordants, comme en témoignent les chiffres suivants, obtenus par Cl. Bernard, sur la sous-maxillaire du chien :

	Oxygène.	Différence.
Sang artériel	$9^{cc},80$	»
Sang veineux de la glande au repos	$3^{cc},82$	$5^{cc},88$
Sang veineux de la glande en activité	$6^{cc},01$	$3^{cc},79$

A ne tenir compte que de ces chiffres, ils prouveraient que la glande consomme moins d'oxygène pendant le travail que pendant le repos, et qu'ainsi les combustions se ralentissent. C'est en effet la conclusion de Cl. Bernard, qui tire argument de ces faits contre la théorie de la combustion ; mais il néglige de tenir compte de l'exagération circulatoire qui accompagne la sécrétion glandulaire et sur laquelle il avait lui-même tant insisté. Il avait vu notamment que le débit d'une veine de la sous-maxillaire devient cinq fois plus considérable, dès qu'on sollicite la sécrétion par l'introduction de quelques gouttes de vinaigre dans la bouche de l'animal. Si nous partons des chiffres précédents, la consommation d'oxygène, qui était seulement de $5^{cc},88$ dans la

glande au repos, s'élève à $3^{cc},79 \times 5 = 18^{cc},95$ pendant la sécrétion. D'où il résulte que l'intensité des combustions devient au moins trois fois plus considérable. Les analyses instituées sur la parotide du cheval par Chauveau et Kaufmann, et dirigées sur les gaz et le glycose du sang, établissent aussi, de la manière la plus claire, que l'activité spontanée des glandes est accompagnée d'une exagération sensible dans les combustions de l'organe, et d'une dépense corrélative de glycose.

Ces phénomènes ont d'ailleurs une intensité médiocre, surtout si on les compare à ceux que l'on observe sur les muscles, dans les mêmes conditions. Mais il n'est pas douteux qu'on leur trouverait une importance bien plus considérable, s'il était possible de les atteindre et de les mesurer dans le foie qui est le siege de réactions si nombreuses. Les recherches de Cl. Bernard, de d'Arsonval ont établi que le foie est le point le plus chaud de l'organisme, et que le sang de la veineporte s'échauffe de 1 degré ou même de 1°,5 en traversant l'organe. Cet échauffement exceptionnel permet de présumer de l'importance et de l'intensité des phénomènes chimiques qui s'accomplissent dans le foie, et concourent à la production de la chaleur totale.

Contribution relative des divers tissus a la calorification. Prépondérance des muscles. — Pour établir la part qui revient aux différents tissus dans la production totale de la chaleur, il faudrait connaître exactement la valeur de leur puissance respiratoire, et leur proportion dans la composition de l'organisme. Sur le premier point, il faut se contenter des résultats obtenus dans les études sur la respiration élémentaire, par la méthode de Spallanzani, et, à l'exemple de Richet, on peut adopter provisoirement les chiffres de Paul Bert. La seconde catégorie de documents peut se trouver dans les recherches de Liebig, sur la composition de l'organisme. A l'aide de ces différentes données, M. Richet a obtenu des résultats approximatifs que nous résumons dans le tableau suivant :

Contribution des différents tissus à la thermogenèse.

Tissus.	Leur proportion dans l'organisme.	Leur pouvoir respiratoire.	Chaleur fournie.	Contribution centésimale.
Muscles........	47,8	1	47,8 × 1 = 47,8	77 p. 100
Cerveau.......	2,3	0,75	2,3 × 0,75 = 1,725	3 —
Viscères.......	19,3	0,35	19,3 × 0,35 = 3,605	6,5 —
Sang.....	5,9	0,3	5,9 × 0,3 = 1,770	3 —
Graisse........	12,7	0,25	15,7 × 0,25 = 3,165	5,5 —
Squelette	19,4	0,16	19,4 × 0,16 = 2,91	5 —

Si ces chiffres sont inexacts dans les détails, et ce n'est point douteux, ils sont vrais dans leurs indications générales, notamment quand ils établissent la prépondérance énorme du tissu musculaire. Par la place qu'ils tiennent dans l'organisme, dont ils constituent presque la moitié, en y comprenant les muscles à fibres lisses, par l'intensité des phénomènes chimiques dont ils sont le siège, les muscles laissent bien loin derrière eux tous les autres tissus. A eux seuls, ils contribuent pour plus des trois quarts à la production de la chaleur totale. Il faut donc les considérer comme les agents essentiels de la calorification. Le chiffre 77 p. 100 qui mesurerait leur contribution est d'ailleurs un chiffre minimum répondant à l'état de repos. Mais on a vu l'in-

fluence considérable exercée par le travail sur la valeur des combustions et de la thermogenèse dans les muscles. On peut donc prévoir que lorsque les muscles sont actifs, ne fût-ce que dans l'exercice régulier de la locomotion, ils fournissent la presque totalité de la chaleur produite, ne laissant à l'ensemble des autres tissus qu'une part tout à fait négligeable.

2° ***Changements portant primitivement sur la déperdition de la chaleur.*** — INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE EXTÉRIEURE SUR L'INTENSITÉ DE LA THERMOGENÈSE. — La température extérieure exerce sur la thermogenèse, dans quelques espèces, une influence tout à fait inattendue et encore inexpliquée qui a été découverte par d'Arsonval. *A priori*, on était autorisé à présumer que l'intensité de la calorification varie en sens inverse de la température extérieure. Conformément à la loi de Newton, le rayonnement calorifique d'un animal, comme celui de tout corps chaud, doit être proportionnel à l'excès de sa température propre sur la température extérieure. Il semble qu'un animal doit perdre d'autant plus de chaleur, et par conséquent en produire d'autant plus, que la température extérieure est plus basse. Or cette relation ne s'observerait qu'à partir d'une température optima (14 degrés pour le lapin) au-dessus de laquelle la thermogenèse se conforme aux exigences de la loi de Newton et décroît au fur et à mesure que la température s'élève. Mais au-dessous de ce niveau optimum, la relation serait renversée. L'intensité de la thermogenèse suivrait la marche de la température et descendrait avec elle. Nous donnons ci-dessous les chiffres obtenus par M. Richet sur le lapin :

Température extérieure.	Coefficient thermique.	Température extérieure.	Coefficient thermique.	Température extérieure.	Coefficient thermique.
o	cal.	o	cal.	o	cal.
— 2........	0,910	+11	3,490	+18	3,570
—10........	1,250	12	4,060	19	3,240
0........	1,660	13	4,150	21	3,150
+ 5........	2,740	14	4,400	23	3,150
8........	2,900	15	3,735	24	2,740
9........	3,320	16	3,720	25	2,650
10........	3,400	17	3,650	28	1,660

La loi de d'Arsonval a été vérifiée par bien des auteurs (Richet, Sigalas, Ansiaux, Langlois); mais son influence ne s'observe que sur le lapin, le cochon d'Inde, et d'après Langlois, sur l'enfant. Il résulte de ces faits que certaines espèces animales auraient la faculté de se soustraire en partie aux effets de la loi de Newton, et il est aisé de concevoir le mécanisme de cette préservation partielle. Il consiste en un réflexe cutané vaso-constricteur qui a pour effet de produire l'anémie presque complète de la peau et d'en abaisser la température. Dès lors l'excès de la température cutanée sur la température extérieure qui donne sa mesure au rayonnement s'affaiblit beaucoup, et la déperdition de la chaleur diminue dans la même proportion. La loi de Newton n'est pas violée et ne saurait jamais l'être, mais ses effets sont moins intenses. Jusque-là il n'y aurait rien que de fort admissible, mais ce qui vient déconcerter toutes les prévisions de la théorie, c'est qu'en regard des changements de la thermogenèse provoqués par les basses températures, il se produit des changements inverses dans l'intensité des combustions. On sait en effet par de nombreuses recherches (Lavoisier, Regnault et Reiset,

Pettenkoffer et Voit, Frédéricq, etc.), et tous les physiologistes qui ont expérimenté sur les échanges respiratoires l'ont constaté, que l'intensité des combustions suit une marche inverse à celle de la température. Il en résulte que, contrairement aux données les plus solidement acquises sur les sources de la chaleur animale, l'intensité des combustions et celle de la thermogenèse subiraient, en fonction de la température et dans les limites précitées, des variations de sens inverse. En apparence, le débit diminue quand l'intensité de la source augmente ; le paradoxe est flagrant. Il faudrait en conclure que l'oxygène est employé à des réactions très différentes et très inégalement thermogènes, selon que la température est plus ou moins élevée. En fait, il résulterait des expériences de Sigalas, qui a déterminé, simultanément sur le lapin, la mesure prise par les échanges gazeux et par la thermogenèse, en fonction de la température, que le pouvoir thermogène de l'oxygène atteint 5^{cal},000 par une température de 16° pour tomber à 2^{cal},761 à 7°. C'est une variation du simple au double. Est-il admissible que les combustions organiques aient des effets à ce point dissemblables ? Il faudrait donc croire que chaque degré de la température appelle des processus chimiques qui lui sont spéciaux.

Tout concourt à faire rejeter une pareille hypothèse. A l'intensité près, la vie reste semblable à elle-même, et l'oxygène n'est pas employé autrement quand il fait froid que quand il fait chaud. Dès lors, pour des conditions alimentaires définies, il dégage toujours la même quantité d'énergie, qui se retrouvera tout entière lorsque le déterminisme de ces singuliers phénomènes sera rigoureusement établi. Pour résumer, le paradoxe contenu dans la loi de d'Arsonval a deux aspects : il consiste d'une part en ce que, dans un petit nombre d'espèces, les animaux perdent d'autant moins de chaleur qu'il fait plus froid au dehors. Mais le phénomène n'est contradictoire qu'en apparence. Il prouverait simplement que ces animaux ont la faculté de restreindre leur déperdition calorifique en agissant sur sa cause physique qui est l'excès de leur température cutanée sur la température extérieure. Ils refroidissent leur tégument par un réflexe vaso-constricteur qui tend à mettre leur surface rayonnante en équilibre de température avec l'air ambiant. Pour ne pas céder leur chaleur, ils s'enveloppent d'un matelas isolant. Ils ne violent pas la loi de Newton, ils la tournent. Mais où la contradiction devient insoluble, c'est lorsque ces mêmes animaux s'efforceraient, par des combustions exagérées, de réparer des pertes qu'ils n'éprouvent pas. C'est lorsque la production de chaleur calculée à partir de l'oxygène consommé excède près de deux fois (expériences de Sigalas) la déperdition mesurée au calorimètre. L'équation nécessaire de l'énergétique biologique serait radicalement faussée. Voilà où réside le vrai paradoxe. Évidemment, il n'est pas soutenable et ses apparences tiennent à ce que les deux termes de l'équation sont inexactement ou incomplètement déterminés.

Le froid influence tout autrement la thermogenèse lorsqu'il agit par l'intermédiaire de l'eau. Ici le réflexe vaso-constricteur ne peut prévaloir contre les effets de la conductibilité du liquide et de son énorme chaleur spécifique. Aussi la déperdition et la production de la chaleur, chez les animaux plongés dans des bains froids, sont en raison inverse de la température. Dans

ce cas, la loi de Newton produit tous ses effets. Dans une série de recherches entreprises à l'aide de la méthode des bains, M. Lefèvre a obtenu un grand nombre de résultats que nous retrouverons dans le paragraphe consacré à la régulation de la température. Nous nous bornerons ici à reproduire la série suivante où l'auteur a mesuré la quantité totale de chaleur perdue par l'organisme de l'homme dans les bains froids aux différentes températures.

Températures du bain.	5°.	12°.	17°.	22°.	26°.	30°.	34°.
Calories cédées par l'organisme en 12 minutes.	300	200	130	80	40	15	»

Ces mesures ont été faites sur un homme adulte de trente ans pesant 65 kilogrammes. Le sujet très vigoureux et longuement exercé à tous les modes de l'hydrothérapie ne se refroidit pas dans les bains. Ces données nous permettent de calculer le coefficient thermique correspondant aux différents termes de la précédente série.

Températures du bain.	5°.	12°.	17°.	22°.	26°.	30°.	34°.
Coefficients thermiques (chaleur produite par heure et par kilogramme)...........	23^{cal},076	15^{cal},384	10^{cal},000	6^{cal},153	3^{cal},076	1^{cal},153	»
Intensités de la thermogenèse en prenant pour unité le coefficient normal. 1^{cal},400 = 1	16,48	10,98	7,14	4,39	2,19	0,82	»

Comme on le voit par les chiffres de la dernière série horizontale, la production de la chaleur acquiert, sous l'influence des bains froids, une intensité considérable. Mais, conformément à la loi de Newton, son accroissement suit une marche inverse de celle de la température du bain. La mesure des combustions donnerait sans aucun doute une série superposable à celle des intensités de la thermogenèse ; mais les déterminations de M. Lefèvre ont porté exclusivement sur la chaleur.

Dans le paragraphe consacré à la régulation thermique, nous retrouverons d'autres faits établissant que, dans les bains froids, l'intensité des combustions se règle sur la déperdition calorifique.

Influence du tégument. — Toutes les circonstances qui modifient le pouvoir émissif de la peau influencent immédiatement le rayonnement cutané, et sollicitent un changement correspondant dans la production de la chaleur et dans l'intensité des combustions. C'est ainsi que le vêtement chez l'homme et la fourrure chez les animaux constituent un matelas mauvais conducteur qui diminue le rayonnement cutané. Leur influence se manifeste par l'exagération des combustions, dès qu'on les supprime. L'homme nu a des combustions plus intenses que l'homme habillé et produit par conséquent plus de chaleur. Frédéricq a réuni sur lui-même onze observations faites à la température de 14° ou 15°, et sa consommation d'oxygène a eu les valeurs moyennes suivantes :

Oxygène consommé en 15'.	Habillé.............	4^{lit},982
	Nu..................	5^{lit},918

D'autre part, d'Arsonval, faisant usage de son anémo-calorimètre, a obtenu sur lui-même les résultats ci-dessous :

	Chaleur produite en une heure.
A jeun, debout et nu...........	$125^{cal},4$
A jeun, debout et habillé........	$79^{cal},2$

Les effets de la tonte sont très intenses. Ils ont été d'abord étudiés par Richet qui a constaté et mesuré l'accroissement considérable du rayonnement cutané sur les lapins rasés. Nous avons d'autre part déterminé les changements corrélatifs apportés par la tonte dans l'intensité des combustions respiratoires et de la thermogenèse, et nous donnons ici la moyenne de huit expériences :

	Coefficient respiratoire en O^2.		Quotient respiratoire.		Coefficient thermique.	
	Normal.	Après la tonte.	Normal.	Après la tonte.	Normal.	Après la tonte.
Moyenne de huit expériences....	$0^{lit},754$	$1^{lit},064$	0,898	0,840	$4^{cal},165$	$5^{cal},972$

L'accroissement moyen des combustions et de la thermogenèse est ici de 40 p. 100, mais il est très variable et dépend beaucoup de la saison et du soin avec lequel l'animal a été rasé. Nous l'avons vu atteindre 80 p. 100. L'excès des combustions destiné à couvrir la chaleur perdue en plus par l'animal privé de sa fourrure doit nécessairement trouver ses aliments dans un supplément de nourriture. En fait, nous avons constaté que ce supplément excède de 35 à 40 p. 100 environ le poids de la ration ordinaire. Réciproquement, si l'on prive un lapin rasé de toute nourriture, l'animal est entraîné dans un mouvement de dénutrition particulièrement intense, se traduisant par la chute rapide de son poids et par l'abaissement de son quotient respiratoire. Il meurt prématurément en deux ou quatre jours avec une température centrale très basse et sans arriver aux limites extrêmes de l'inanition, car il ne perd que 15 à 20 p. 100 de son poids initial, alors que les inanitiés ordinaires ne succombent qu'après avoir perdu 35 ou même 40 p. 100 de leur poids primitif. Il n'épuise donc pas toutes les ressources alimentaires de ses tissus et c'est en ce sens que nous avons pu introduire l'expression « *d'inanition abrégée* ». L'inanition est abrégée toutes les fois qu'on réclame de l'animal privé de nourriture des dépenses chimiques exceptionnelles, et la tonte constitue un moyen tout à la fois très précis et très sommaire d'obtenir ce résultat. On ne voit pas très clairement les raisons qui viennent abréger l'inanition dans ce cas particulier, c'est-à-dire celles qui empêchent l'animal d'arriver à la limite des ressources alimentaires contenues dans sa substance, et l'obligent à mourir avant d'être arrivé aux limites ordinaires de sa diminution de poids. On pourrait admettre que le mouvement d'histolyse chargé de fournir au foie les matériaux de ses opérations glycogénétiques n'est pas assez intense pour offrir à l'animal des ressources égales aux dépenses exceptionnelles qui lui sont imposées. Quoi qu'il en soit, nous allons trouver dans le vernissage un nouvel exemple « d'inanition abrégée ».

Influence du vernissage. — Pour montrer les changements subis par la

thermogenèse chez les animaux dont la peau a été revêtue d'un enduit imperméable, nous compléterons le tableau précédent en y ajoutant les valeurs prises par les coefficients respiratoire et thermique, sur les animaux rasés, puis vernis.

	Coefficient respiratoire en O^2.			Quotient respiratoire.			Coefficient thermique.		
	Normal.	Après la tonte.	Après le vernissage.	Normal.	Après la tonte.	Après le vernissage.	Normal.	Après la tonte.	Après le vernissage.
Moyenne de huit expériences.	$0^{lit},754$	$1^{lit},064$	$1^{lit},447$	0,898	0,840	0,766	$4^{cal},165$	$5^{cal},972$	$7^{cal},583$
Accroissements.	1	1,41	1,92	»	»	»	1	1,43	1,82

Nous n'avons plus qu'à rappeler sommairement les faits principaux exposés dans le mémoire spécial que nous avons consacré aux effets du vernissage (1897). Il résulte des chiffres contenus dans le tableau ci-dessus, que le rayonnement calorifique augmente en moyenne de 80 p. 100 chez les lapins rasés et revêtus d'une couche d'huile d'olive. Le premier effet du vernissage est donc d'accroître le pouvoir émissif de la peau, et d'exagérer dans une proportion considérable l'importance de la déperdition calorifique. Ce fait était connu depuis longtemps et on en avait tiré la théorie de la mort par le froid. Mais on ne savait pas que les animaux vernis s'efforcent de lutter contre le refroidissement et de réparer leurs pertes calorifiques exceptionnelles par un excès dans les combustions égal à l'excès de la déperdition. On constate même dans le tableau ci-dessus que ces combustions dépassent assez sensiblement la perte de chaleur, et nous allons dire la cause de ce désaccord. En tout cas, l'exagération des combustions qui accompagne l'exagération du rayonnement cutané démontre que la fonction régulatrice s'exerce avec précision. En fait, tant que les animaux séjournent dans le calorimètre et restent à l'abri du froid extérieur, non seulement leur température reste invariable, mais elle augmente constamment pendant la durée du séjour de l'animal dans l'appareil. La production de la chaleur dans ce cas l'emporte donc sur la déperdition, et c'est pourquoi, comme on l'a vu dans le tableau précédent, les combustions dépassent la mesure du rayonnement calorifique.

Mais cet échauffement des lapins vernis n'a précisément lieu que pendant les expériences servant aux déterminations calorimétriques et respiratoires, et il tient à ce que l'animal est protégé contre le froid. En dehors du calorimètre, les lapins vernis se refroidissent toujours, lentement d'abord et rapidement ensuite, pour succomber vers le troisième jour, avec une température dont la moyenne, dans nos huit expériences, a été de 28°,3.

Pour se rendre compte des causes de ce refroidissement et de la mort qui en est le terme, il suffit de considérer le mouvement intense de dénutrition qui caractérise le vernissage. Ce mouvement a une double expression : la faible valeur du quotient respiratoire, et l'amaigrissement rapide des malades. Dans nos huit expériences, la valeur moyenne du coefficient de dénutrition a été de 60 grammes (poids perdu par kilogramme et par vingt-quatre heures),

soit le double du coefficient de dénutrition, chez les inanitiés ordinaires. Les animaux vernis font donc de larges emprunts à leurs tissus pour y trouver la matière de leurs combustions exceptionnelles. Il fallait en inférer que leur alimentation est insuffisante et il était indiqué de les étudier à ce point de vue. Or, nous avons constaté qu'un lapin normal de 2 kilogrammes consomme 185 grammes de fourrage par jour, 251 grammes quand il est rasé, et 87 grammes seulement quand il est verni, soit environ la moitié de la ration nécessaire à l'entretien du sujet à l'état normal. Le vernissage a donc cet effet de doubler les dépenses chimiques nécessaires à la calorification et de réduire de moitié les recettes alimentaires. Il en résulte que les pertes sont quatre fois plus considérables que les dépenses, et que l'organisme est obligé de faire banqueroute. Ici, comme chez les inanitiés dont on exige des dépenses extraordinaires, le mouvement de l'histolyse, si précipité qu'il soit, n'est pas assez rapide pour subvenir aux besoins nouveaux de l'organisme, et l'animal meurt sans être allé jusqu'au bout des ressources disponibles dans ses tissus. Les lapins vernis ne survivent que trois jours en moyenne, après avoir perdu 17 p. 100 de leur poids seulement, alors que pour les dépenses minima de l'inanition normale les tissus peuvent livrer 40 p. 100 de leur poids. C'est dans cette circonstance que réside la caractéristique de l'inanition abrégée, et la physiologie d'un lapin vernis est la même que celle d'un lapin rasé qu'on prive d'aliments. Il vit et il meurt comme lui.

Nous conclurons que le vernissage agit par la combinaison de deux effets : un effet purement physique consistant dans l'accroissement du pouvoir émissif de la peau et de la déperdition calorifique, et un effet physiologique consistant dans l'interruption des fonctions digestives et aboutissant à la diminution des recettes alimentaires. L'animal est mis ainsi en état d'inanition abrégée. Il meurt de froid parce qu'il meurt de faim. Cette explication nous dispense de faire la revue critique et historique des théories émises sur la pathogénie des effets du vernissage.

CHAPITRE VI

FIXITÉ RELATIVE DE LA TEMPÉRATURE CENTRALE. — LIMITES ET LOIS DE SES VARIATIONS PHYSIOLOGIQUES

En regard des variations de la thermogenèse que nous venons d'étudier, il est intéressant de constater la fixité à peu près complète de la température centrale. Nous voulons dire que ses variations normales restent toujours enfermées dans des limites fort étroites. Nous allons les passer sommairement en revue. La plupart des documents qui suivent sont d'ailleurs empruntés à la physiologie de l'homme.

Variations nycthémérales de la température. — Dans le cours de la journée de vingt-quatre heures, la température de l'homme subit une double oscillation, régulière, lente et périodique. Elle parvient à son maximum le soir, de quatre à sept heures, et atteint 37°,5. A partir de ce moment, elle descend régulièrement et tombe à son minimum 36°,70, qu'elle atteint vers

cinq heures du matin. Ces chiffres sont ceux de Jürgensen. D'après M. Richet, on pourrait admettre les températures suivantes : maximum vespéral 37°,8; minimum matinal 36°,6 (température rectale). La température axillaire oscillerait de 37°,5 à 36°,5; ces différents chiffres font ressortir un écart quotidien de 1 degré à 1°,2.

La courbe des variations diurnes de la température de l'homme a une forme régulière et constante, quels que soient le climat et le régime; elle n'est pas modifiée par le jeûne même prolongé, comme l'a vu Luciani (1889) dans ses études sur le jeûneur Succi.

La cause des variations nyctémérales est difficile à préciser. On inclinerait tout d'abord à subordonner ces variations aux alternances de l'activité et du repos, d'autant que la courbe qui les exprime subirait une inversion complète chez les ouvriers nocturnes. Mais U. Mosso (1887) n'est pas parvenu à obtenir cette inversion sur lui-même.

D'ailleurs, il est d'autant plus malaisé de faire la théorie des changements diurnes de la température, que ces changements échappent à toutes les influences qui se succèdent dans la journée. Ils échappent à l'influence de l'activité, car celle-ci se poursuit bien au delà du maximum vespéral. Ils échappent à celle de l'alimentation, puisque la chute de la température n'est pas entravée par le repas du soir. Ils échappent, enfin, à l'influence du sommeil, puisque la température commence à se relever pendant la nuit et longtemps avant le réveil, pour la plupart des hommes.

En résumé, la valeur de la température n'est pas subordonnée aux causes qui modifient les dépenses chimiques, et la courbe qui exprime la marche de ses variations quotidiennes n'est pas superposable à celle des combustions et de la production de la chaleur. Ce désaccord a été bien mis en évidence par les recherches de Frédéricq sur les variations diurnes de la consommation d'oxygène. Il faut donc admettre que les oscillations nyctémérales de la température dépendent du système nerveux et d'une sorte de rythme qui préside à l'exercice de la fonction régulatrice.

On a observé les variations quotidiennes de la température sur quelques espèces animales comme le cheval (Liska), sur les canards (Martins) et sur les pigeons (Chossat, Corin et Van Beneden); mais elles ont une très faible amplitude et atteindraient à peine 0°,3 à 0°,4.

Influence de l'alimentation. — On vient de voir que chez l'homme les repas n'ont aucune influence sur la marche de la température. Il en est autrement sur les animaux, si nous en jugeons par ce qui a lieu chez le chien. Nous avons souvent constaté dans cette espèce une élévation de température qui survient peu d'instants après le repas et qui atteint plusieurs dixièmes de degré. On observerait sans doute le même phénomène chez les grands herbivores, comme le cheval et le bœuf, chez lesquels la préhension et la mastication des aliments réclament un travail assez considérable. Mais l'ingestion des aliments et notamment des aliments liquides est suivie, dans ces espèces animales, d'un refroidissement très sensible qui va jusqu'à provoquer des tremblements musculaires. Ce n'est là d'ailleurs qu'une action directe et purement physique due à la chaleur spécifique de l'eau et dont les effets sont peu durables.

L'influence du jeûne sur la température centrale offre un très grand intérêt que les observations de Chossat, de Martins, d'Arloing, etc., ont mis en lumière. La privation absolue d'aliments aboutit à la mort précédée d'une chute rapide et plus ou moins profonde de la température. Le refroidissement des animaux privés d'aliments commence dès le début même de l'inanition, mais il suit une marche très inégale comportant trois périodes : une période de vingt-quatre ou quarante-huit heures dans laquelle la température centrale s'abaisse de 1 ou 2 degrés; une période qui embrasse presque toute la durée de l'inanition et dans laquelle la température centrale reste à peu près stationnaire ou ne subit qu'une très faible diminution quotidienne de 0°,1 environ; enfin une dernière période caractérisée par une chute rapide et profonde de la température et annonçant la mort prochaine. C'est la période agonique. Il est très instructif de constater que ce refroidissement final des inanitiés coïncide avec la disparition du glycose dans le sang et l'interruption de la fonction glycogénique (Chauveau, 1856). On trouverait peu de faits aussi démonstratifs à l'égard du rôle du glycose et de la glycogénie dans la calorification. Mais nous ne saurions insister à nouveau sur ce point auquel nous avons consacré plus haut les développements qu'il réclamait.

La résistance des inanitiés dépend à la fois de la glycogénie hépatique, de l'histolyse qui en libère les matériaux, des réserves d'énergie représentées par les graisses de l'organisme ou par les tissus vivants et enfin de l'économie qui préside à l'emploi de ces réserves. On a vu déjà comment on abrège singulièrement le processus de l'inanition, si on dépasse les ressources alimentaires de l'histolyse en infligeant à l'inanitié des dépenses exceptionnelles, répondant à des besoins nouveaux de calorification, comme dans la tonte ou le vernissage. Dans ce cas, l'intensité de la dépense excède l'intensité de l'histolyse, et le refroidissement final survient prématurément, laissant inemployée la meilleure part des réserves alimentaires offertes à l'animal par ses propres tissus.

Mais, en général, l'inanitié vit aussi économiquement que possible, et il réduit ses dépenses au minimum. C'est là le secret de la résistance extraordinaire offerte par certains individus qui ont pu, sans se refroidir sensiblement, subir des jeûnes très prolongés. Après trente jours de jeûne, le fameux Succi, observé par Luciani (1889), avait encore une température centrale oscillant entre 36°,5 et 37°. D'après Monin et Maréchal, le jeûneur Stefano Merlati faisait encore monter le thermomètre à 36°,8, quarante-trois jours après le début de l'inanition (1888).

Influence de l'âge. — Elle n'a guère été étudiée que sur l'homme, et se manifeste surtout au moment de la naissance. Selon les observations de Davy, Roger, Andral, Barensprung, la température des nouveau-nés, prise au moment de la naissance, serait un peu supérieure à celle de la mère. Elle serait de 38°,2 d'après Andral et de 37°,81 d'après Barensprung. Il faut donc admettre que le fœtus est un peu plus chaud que sa mère, ce qui s'explique aisément si on réfléchit qu'il ajoute sa chaleur propre à celle que lui fournit l'utérus. La plupart des observateurs sont d'accord pour admettre que, dans les premiers moments qui suivent la naissance, la température

des enfants subit une chute brusque qui peut la faire tomber à 35° ou 34°. Mais ce refroidissement est très passager, et le retour à la normale s'opérerait, soit en quelques minutes (Andral), soit en quelques heures (Raudnitz). Par contre, dans les espèces animales où les petits naissent les yeux fermés, comme le lapin, le chien ou le chat, les nouveau-nés sont très exposés au refroidissement et leur température s'abaisse très rapidement, dès que leur mère s'éloigne d'eux (Williams Edwards). On trouve la même tendance chez les enfants qui naissent avant terme et qu'il est nécessaire de protéger contre le refroidissement par des précautions exceptionnelles.

Dans les autres phases de la vie, la température centrale ne subit pas de modifications bien sensibles. Dans l'enfance et durant la première année, elle peut être évaluée à 37°,5, chiffre très peu différent de celui de l'adulte. Chez les vieillards, la température moyenne serait inférieure de quelques dixièmes de degré à celle de l'adulte [Mossé et Ducamp (1886); Kelynack (1891)]. Tout récemment, M. A. Chelmousky, à la suite d'un grand nombre de mensurations thermométriques effectuées à l'hospice des vieillards de Varsovie, aboutit à la même conclusion, mais il ajoute que la température sénile est sujette à des fluctuations très considérables et très irrégulières, et qu'enfin la courbe diurne offre un type inverse au type accoutumé. L'auteur explique cette anomalie par l'athérome artériel qui aurait pour effet de soustraire la circulation cutanée aux actions régulatrices.

Influence du climat et de la température extérieure. — Les animaux à sang chaud peuvent supporter des écarts très considérables dans la température extérieure (celle de l'air) et s'exposer à l'influence des climats extrêmes. Sous tous les climats et à toutes les latitudes, leur température propre reste invariable, ou plutôt ne subit que de faibles variations que nous allons examiner. Citons d'abord les observations bien connues de Brown-Séquard et de Davy. Dans un voyage de Londres à Ceylan, ce dernier a observé, sur les hommes de l'équipage, un accroissement moyen de 1°,93. Brown-Séquard, partant du Havre pour se rendre aux Antilles, a constaté une variation de 0°,88, correspondant à un écart de 21° dans la température extérieure. Au cours d'une traversée de l'Atlantique, Mantegazza a fait aussi des observations du même ordre ; il a constaté, sur les hommes de l'équipage, une température moyenne de 36°,4 en février, et de 37°,95 en juillet, soit un écart de 1°,55 correspondant à une variation de 28°,5 dans la température extérieure. Selon Eydoux et Souleyet, du cap Horn, où la température extérieure était de 0°, à Calcutta, où le thermomètre montait à 40°, la température moyenne des hommes se serait élevée seulement de 1 degré.

D'après Jousset, la température de l'homme dans les régions tropicales est supérieure de 0°,6 à 0°,8 à celle des races qui vivent dans les régions tempérées. Cet observateur a trouvé pour moyenne de la température axillaire sur les Hindous, les nègres du Congo ou des Antilles, le chiffre 37°,66, la moyenne européenne étant de 37°. Cette différence tient exclusivement au climat et non à la race, car les Européens transportés dans les pays chauds atteignent la même température que les indigènes (Jousset, Maurel).

L'influence du climat trouve enfin une expression particulièrement authentique dans les moyennes adoptées par les médecins des différents pays, comme mesure de la température normale. C'est ainsi que les médecins italiens adoptent le chiffre 37°,3, tandis que les Norvégiens s'arrêtent à celui de 36°,4 (température axillaire).

L'ensemble de ces observations prouve surabondamment que l'homme possède au plus haut degré la faculté de lutter contre les variations de la température extérieure. Il en est de même des autres homœothermes, mais nous nous bornerons ici à rappeler les observations de Back qui, au cours d'un de ses voyages dans les régions antarctiques, a constaté par un froid de —35° une température centrale de 43°,5 sur le lagopède des saules et sur la gélinotte noire. Ces animaux étaient donc capables de maintenir entre eux et l'extérieur une différence de température atteignant 79° ou 80°.

Les *saisons* agissent dans le même sens que le climat et pour la même raison. Dans nos climats tempérés, la température centrale est un peu plus élevée en été qu'en hiver, et d'après Forel la différence atteindrait 0°,6. D'après Richet, la température des lapins serait en février 39°,5, en avril 39°,7, et en mai 40° ou 40°,3. L'état du tégument plus ou moins pourvu de fourrures exerce une influence facile à prévoir. Les chiens à poils ras ont une température de 38°,8, pendant que les chiens à poils longs font monter le thermomètre à 39°,6 (Richet). Selon le même auteur, la température descend de 39°,7 à 39°,1 chez le lapin, après la tonte.

Influence des bains. — L'action des bains est une action artificielle à l'aide de laquelle il est toujours possible de modifier profondément la température d'un animal. Elle constitue par conséquent une influence exceptionnelle et anormale que nous étudierons plus utilement dans le chapitre consacré à la régulation de la température.

Influence du travail. — Nous avons vu que tous les modes de l'activité : travail musculaire, travail psychique (?), émotions, etc., ont pour effet d'élever la température centrale et nous avons précisément trouvé dans cet échauffement du corps l'une des expressions de la thermogenèse exceptionnelle qui accompagne le travail. Il ne convient pas de revenir sur ces faits, mais nous en dégagerons ici cette loi, que lorsque le travail musculaire reste contenu dans les limites physiologiques, il élève faiblement la température centrale tout en déterminant une exagération considérable dans la production de la chaleur. Il apparaît ainsi que les animaux ont la faculté de lutter indifféremment contre la chaleur intérieure et contre la chaleur extérieure.

CHAPITRE VII

RÉGULATION DE LA TEMPÉRATURE. — RÉSISTANCE A LA CHALEUR ET AU FROID. — MÉCANISME DE CETTE RÉSISTANCE

Nous venons de voir qu'en dépit des causes qui tendent à produire l'échauffement ou le refroidissement des homœothermes, la température centrale demeure à peu près invariable. En un mot, les animaux à sang chaud

ont la faculté de lutter contre le froid et contre la chaleur, dans des limites fort étendues, et dont on peut se faire une idée par la seule considération des climats extrêmes compatibles avec la vie. On a observé en Sibérie des froids de — 60°. Au cours de ses voyages dans les régions polaires, le capitaine Back a constaté, comme nous le rappelions plus haut, que par des froids de — 35°8 les oiseaux de la région conservaient leur température normale, 43°,3 (lagopède des saules, gelinotte noire). A Charlestown, la température peut atteindre 32° à l'ombre, et 51° au soleil. Au Sénégal, on voit le thermomètre monter à 40° ou 45° et Adanson a constaté ces températures dans sa propre chambre. Ce sont là des températures extrêmes, et les derniers chiffres qui viennent d'être cités montrent bien que les homœothermes peuvent avoir à lutter contre la chaleur extérieure. Mais en général, et à ne considérer que les climats tempérés, la température des animaux à sang chaud excède d'une vingtaine de degrés, environ, la température extérieure. Vis-à-vis du climat, ces animaux sont donc placés de telle façon qu'ils ont à lutter en permanence contre le froid pour maintenir la fixité de leur température propre. Mais ils ont aussi à lutter contre la chaleur intérieure dont ils sont eux-mêmes le foyer et dont la production peut, nous l'avons vu, s'exagérer au point de quintupler ou décupler sous l'influence du travail. Pour maintenir la fixité de sa température propre, l'organisme doit ainsi intervenir à chaque instant pour corriger tour à tour deux variables : la production et la déperdition de la chaleur. La régulation a précisément pour effet d'assurer l'égalité constante de ces deux termes, et si les homœothermes sont en état de lutter victorieusement contre les causes d'échauffement ou de refroidissement, c'est en vertu d'un équilibre qui s'établit automatiquement entre la chaleur produite ou gagnée et la chaleur perdue. Cet équilibre ne peut évidemment être assuré que par l'intervention du système nerveux agissant tour à tour, avec la précision et l'automatisme qui en sont les attributs essentiels, sur les sources de la chaleur ou les voies de sa dispersion. Les moyens essentiels de la régulation ne peuvent donc être que des actions réflexes sollicitées par les impressions primitives du froid ou du chaud et se dénouant dans les agents de la production ou de la dépense calorifiques.

Sensibilité thermique. — Les impressions thermiques du chaud ou du froid atteignent primitivement la surface du tégument, et, dès qu'elles acquièrent une certaine intensité, elles éveillent des sensations correspondantes de chaud ou de froid. C'est là proprement la sensibilité thermique, et il est intéressant de constater que cette sensibilité ne s'éveille que pour certaines valeurs de la température extérieure. Il existe une température optima, 15° à 16° environ, pour laquelle il ne se produit aucun autre état de conscience qu'un sentiment de bien-être excluant la sensation pénible du froid ou du chaud. La fonction régulatrice ne cesse pas de s'exercer pour cela, mais elle obéit à des sollicitations inconscientes et se borne à contenir dans son intensité actuelle le courant d'énergie qui traverse l'organisme et s'écoule au dehors sous forme de chaleur.

Dès que la température propre subit des changements en un sens ou en

l'autre, les centres nerveux sont directement impressionnés et les actes de la régulation sont d'origine centrale. Il y a donc lieu de distinguer deux modes de sensibilité thermique : la sensibilité périphérique, lorsque les impressions qui l'éveillent procèdent du chaud ou du froid extérieurs, et la sensibilité centrale toujours sollicitée par le chaud ou par le froid internes,et impliquant soit l'échauffement, soit le refroidissement de l'animal. La première est exquise et domine la régulation dans les conditions ordinaires de la vie. La seconde est obtuse et n'intervient que dans des conditions exceptionnelles, le plus souvent expérimentales et assez puissantes pour modifier la température centrale de l'animal.

Actes centrifuges et réflexes de la régulation. — Quel que soit leur point de départ, les impressions thermiques déterminent les mêmes actions régulatrices qui restent toujours empreintes du même automatisme. Ces actions qui s'exercent au moyen des nerfs centrifuges sont faites, nous l'avons vu, pour graduer l'intensité de la production calorifique ou de sa déperdition.

Les premières peuvent être embrassées dans l'expression générique de *réflexes thermogènes*. Elles influencent la production de la chaleur par l'intermédiaire des tissus et notamment du tissu musculaire, soit en réglant l'intensité de leur travail physiologique, soit en éveillant en eux des actions chimiques indépendantes. Il est impossible sans doute de faire la part de ces deux modes d'intervention, mais nous avons vu que si les tissus produisent nécessairement de la chaleur, à l'occasion et en raison de leur activité propre, on ne peut leur refuser le pouvoir de déterminer des actions chimiques thermogènes indépendantes des manifestations de leurs propriétés physiologiques. Quoi qu'il en soit, les tissus restent les instruments inévitables du système nerveux dans la production de la chaleur, et parmi eux le tissu musculaire les dépasse tous, soit par l'intensité des actions chimiques qu'il tient sous sa dépendance, soit par l'importance de son développement dans l'organisme. A ce titre, il doit être considéré comme l'instrument le plus souple, le plus puissant et le plus utile, mis à la disposition du système nerveux pour graduer la production de la chaleur.

Quant à l'intensité de la déperdition, elle est aisément influencée soit par les actions vaso-motrices qui modifient la circulation et la température de la peau, soit par les actions sécrétoires qui répandent à la surface du tégument et offrent à l'évaporation des quantités variables d'eau, soit enfin par le rythme respiratoire et la ventilation pulmonaire qui règlent l'exhalation de la vapeur d'eau. La volatilisation de l'eau à la surface du corps est un des moyens les plus puissants de la lutte de l'organisme contre la chaleur. On le comprendra aisément si on se rappelle que la chaleur latente de volatilisation de ce liquide est de 580 calories, ce qui veut dire que la volatilisation de 1 kilogramme d'eau consomme 580 calories. Toutes ces actions ont encore un caractère réflexe, et, pour user de la même terminologie, on peut les embrasser dans l'expression de *réflexes déperditeurs*. Tels sont les principaux moyens mis en œuvre par le système nerveux, pour assurer la régulation de la température.

De la lutte contre le froid.

Réflexe cutané vaso-constricteur. — La constriction des vaisseaux cutanés a deux effets corrélatifs : D'une part elle produit un déplacement de la masse sanguine qui abandonne la peau pour se réfugier dans les régions profondes et se trouve ainsi soustraite à l'influence réfrigérante du milieu extérieur. D'autre part, elle produit l'abaissement de la température de la peau qui, n'étant plus chauffée par le sang, tend à se mettre en équilibre de température avec le dehors et rayonne d'autant moins de chaleur qu'elle est plus près de cet équilibre. L'anémie consécutive au réflexe cutané vaso-constricteur a tous les degrés possibles, car elle dépend de la puissance du réflexe et de la vivacité des impressions thermiques qui l'ont déterminée ; mais, grâce à la solidarité et à la combinaison des effets qu'elle entraîne, elle peut réduire considérablement la déperdition de la chaleur et constitue un moyen de défense extrêmement puissant.

Le déplacement du sang abandonnant la peau pour gagner les régions profondes a pour effet d'accroître la pression artérielle et d'augmenter le débit de la circulation dans les muscles. Il se produit ainsi une véritable compensation que les expériences de Wertheimer ont bien mise en évidence. Tous les viscères pourraient *à priori* recevoir les effets de cette dérivation, mais, chose singulière, les vaisseaux du rein se rétrécissent en même temps que ceux de la peau (Wertheimer). Quoi qu'il en soit, le tégument dispose d'un système vaso-moteur autonome qui lui permet de se soustraire à des degrés divers à la pénétration du sang. Il peut ainsi constituer un matelas protecteur dont l'action isolante pénètre jusqu'aux aponévroses sous-jacentes. Il en résulte que les muscles séparés du dehors par ce matelas mauvais conducteur conservent une température égale à la température centrale.

Le réflexe cutané vaso-constricteur a des expressions multiples et obéit à des conditions diverses. On connaît l'expérience de Brown-Séquard et Tholozan consistant à obtenir le refroidissement d'une main pourvue d'un thermomètre par l'immersion de l'autre main dans l'eau froide. François Franck a modifié la forme de cette expérience en enregistrant le réflexe vaso-constricteur à l'aide de ses méthodes volumétriques. Nous obtenons aisément le même résultat à l'aide de notre sphygmographe digital.

Mais il ne faut pas oublier que le réflexe vaso-constricteur provoqué par l'abaissement de la température extérieure s'étend à toute la surface du tégument. Son expression se trouve dans ce fait très simple que la peau est plus froide en hiver qu'en été. Il est constant, d'ailleurs, que le débit de la circulation cutanée est placé sous la dépendance de la température extérieure et, depuis que nous faisons usage de notre sphygmographe digital, nous sommes conduit à distinguer un pouls d'hiver à très faible amplitude et un pouls d'été caractérisé, au contraire, par une très grande hauteur.

D'après Stefani (1895), le réflexe cutané vaso-constricteur réclamerait l'action directe du froid sur la peau, car on ne l'obtient pas si on se borne à administrer le froid sous la forme d'un courant d'eau traversant la profondeur d'un

membre. L'expérience de Stefani prouverait que le réflexe cutané vaso-constricteur ne se produirait pas sous l'influence du *froid interne* et n'aurait pas lieu conséquemment chez les animaux refroidis et s'efforçant de retrouver leur chaleur perdue. Sur ce point, nous avons deux ordres de faits contradictoires que nous avons observés à différentes reprises. Dans nos recherches sur la régulation de la température (*Soc. de biologie*, 1892), nous avons expérimenté sur des lapins et sur des chiens dont nous obtenions le refroidissement par l'asphyxie en vase clos et que nous placions dans un calorimètre inscripteur, dès que le refroidissement (3° ou 4°) était obtenu. Or, dans tous les cas, nous avons constaté une diminution considérable dans le rayonnement cutané pendant la durée de la régulation et jusqu'au retour de la température normale. La courbe de la radiation thermique atteignait une amplitude moitié moindre environ que celle de la radiation normale recueillie immédiatement avant l'expérience. Par contre, nous nous sommes convaincu par des épreuves toutes récentes et encore inédites que le rayonnement cutané demeure invariable chez des chiens refroidis de plusieurs degrés par un bain prolongé dans l'eau froide. Pendant toute la durée de leur réchauffement, après le bain, les animaux fournissent, en effet, une courbe identique à celles qu'ils fournissaient avant le bain. Il en résulte que l'excès de chaleur qu'ils produisent pour retrouver leur température initiale est précisément égale à celle qu'ils ont perdue pendant le bain.

Sous l'influence des douches et des bains froids, le réflexe cutané va constricteur se produit avec une très grande puissance et une très grande efficacité; nous raconterons plus bas une expérience de Lefèvre très instructive à cet égard, dans laquelle la température initiale du bain était de 4°,4. En se reportant aux chiffres de cette expérience (p. 944), on voit que, dès les premiers moments de son immersion dans le bain, l'organisme subit une déperdition de chaleur vraiment énorme, qu'il répare immédiatement, mais qui ne tarderait pas à triompher de sa résistance sans l'intervention du réflexe cutané vaso-constricteur. En effet, dès les premiers instants, la peau cède, à l'eau froide qui l'enveloppe, 101 calories par minute, mais bientôt elle n'en cède plus que 15 environ dans le même temps, et le sujet devient capable de réparer des pertes singulièrement amoindries et provisoirement tolérables. Un changement aussi profond ne peut être dû qu'à la constriction des vaisseaux cutanés.

La plupart des animaux trouvent d'ailleurs, soit dans leur fourrure, soit dans leur plumage, une protection très puissante contre le froid et dont la suppression met en évidence toute l'efficacité. Il est très remarquable de constater que chez les animaux privés de leur fourrure, comme les lapins rasés, le réflexe vaso-constricteur ne semble pas intervenir. La peau de ces animaux est toujours très chaude en effet, et les épreuves calorimétriques montrent qu'elle rayonne de très grandes quantités de chaleur. On a déjà vu comment le vernissage a pour effet d'exagérer encore le rayonnement. Ces faits ont d'autant plus d'intérêt que la chaleur produite par les animaux rasés ou vernis concorde aussi exactement que possible avec les combustions effectuées. On a vu, au contraire, que sur ces mêmes animaux revêtus de

leur fourrure, les températures décroissantes, à partir de 15°, auraient pour effet de diminuer l'intensité du rayonnement cutané et d'accroître simultanément les combustions. Nous nous sommes arrêtés en temps utile sur ce phénomène, et nous n'avons à le rappeler que pour y voir une des expressions les plus authentiques du réflexe vaso-constricteur.

Des réflexes thermogènes. — L'hyperproduction de chaleur faite pour compenser l'excès de la déperdition due au froid, a sa source dans une activité nouvelle des tissus et notamment du tissu musculaire; cette activité réflexe trouve deux expressions particulières : l'accroissement de la tonicité musculaire et le frisson thermique.

Accroissement de la tonicité musculaire. — On connaît la théorie du tonus : les muscles sont constamment actifs et, jusque dans l'immobilité du repos, ils continuent à recevoir les excitations du système nerveux central qui les maintient en un état de tension active et sollicite en eux une contraction permanente et d'intensité variable. Il y aurait là une source intarissable et toujours disponible de chaleur capable de graduer son débit et de livrer les quantités qui lui sont réclamées par le système nerveux en présence du froid. Quoi qu'on puisse penser de cette conception, l'intervention de l'activité musculaire ne saurait plus être mise en doute quand elle se manifeste par des actes précis, comme les tremblements musculaires qu'on rencontre sur les animaux qui luttent contre le froid, et que M. Richet a étudiés sous le nom de frisson thermique.

Du frisson thermique. — Le frisson thermique se manifeste ou peut se manifester avant l'abaissement de la température centrale, et dès les premières impressions du froid sur la peau. Il est d'observation courante chez l'homme. On l'observe également chez les animaux, notamment chez les petits chiens à poil ras, comme les levriers d'appartement. On le constate aussi chez les chevaux tondus, si on ne prend pas la précaution d'abriter ces animaux dans de chaudes habitations ou de les protéger par d'épaisses couvertures. Dans tous les cas, le frisson thermique est d'origine périphérique. Mais il peut être d'origine centrale et c'est probablement le cas des tremblements qu'on observe chez certains chevaux après l'ingestion des boissons, à moins que la muqueuse intestinale, c'est-à-dire le tégument interne, ne soit apte comme la peau à recevoir les impressions thermiques. C'est un point à examiner. Pour observer avec certitude le frisson thermique d'origine centrale, il suffit de refroidir des animaux, soit dans un bain d'eau froide, soit par le sommeil chloralique (Richet). Pendant le refroidissement, le frisson thermique se manifeste dès que la température centrale atteint 30° ou 32°.

Exagération des combustions respiratoires. — Les réflexes thermogènes ont précisément pour effet d'entraîner l'exagération des combustions et partant un excès dans la thermogenèse juste suffisant pour compenser l'excès de la déperdition dû à l'action du froid. C'est une notion classique que l'intensité des combustions varie en sens inverse de la température extérieure. Les expériences de Colasanti sur le cobaye ont montré que cette intensité peut être doublée sous l'influence du froid. Mais le sens de la variation se

renverse lorsque la température extérieure s'élève, et à partir d'un certain degré, mal déterminé d'ailleurs, et variable avec les espèces animales, les combustions s'accroissent avec la température extérieure. Nous sommes ainsi conduits à enregistrer prématurément l'influence excitante de la chaleur sur la thermogenèse. Mais nous devons réserver l'étude de ce point particulier.

L'exagération des combustions atteint ses dernières limites sous l'action des bains froids ; elle a été étudiée surtout par Sigalas et par Quinquaud (1887). Celui-ci, qui expérimentait sur le chien, a obtenu des résultats très inégaux, mais, si nous dépouillons ces résultats, nous constatons que l'accroissement moyen a été de 300 p. 100 environ. La température des bains a varié de 6° à 12° et, dans tous les cas, les animaux ont subi un refroidissement intense.

Nous avons obtenu, par les bains froids, des effets plus uniformes que nous assemblons dans le tableau ci-dessous. Disons d'abord que la baignoire qui contient l'animal se confond avec l'appareil destiné à la mesure des échanges gazeux : il en résulte que l'immersion du sujet dans l'eau froide est nécessairement incomplète et n'intéresse que la moitié ou les trois quarts du corps. Pour éviter l'absorption du CO^2 dans le liquide du bain, l'eau était saturée de sel marin.

Valeurs prises par les combustions respiratoires sur des animaux plongés partiellement dans l'eau froide et salée.

Expériences.	Animaux.	Masse et température du bain.	Durée du bain.	Oxygène consommé par heure et par kilog. — Avant le bain.	Oxygène consommé par heure et par kilog. — Pendant le bain.	Accroissement des combustions.	Température centrale. — Avant le bain.	Température centrale. — Après le bain.
I......	Lapin de 2kg,750.	8 lit. d'eau à 12°.	3 heures.	0lit,450	1lit,594	1 à 3,54	39°,3	36°
II.....	Chien de 3kg,260.	10 lit. d'eau à 10°.	2 heures.	0lit,838	2kg,545	1 à 3,04	38°,7	35°,8
III....	Chien de 3kg,120.	10 lit. d'eau à 10°.	2 heures.	0lit,838	2kg,898	1 à 3,45	38°	37°,2
IV....	Lapin de 1kg,455.	7 lit. d'eau à 10°.	1h,30	0lit,888	1lit,498	1 à 1,68	38°,8	29°,7

On voit que dans les conditions particulières où sont placés nos animaux, ils subissent au même degré les effets des bains froids et que, sous cette influence, l'intensité des combustions a été plus que triplée. Il n'y a de différence que pour l'expérience IV où il s'agit d'un jeune lapin incapable de lutter et qui se refroidit très rapidement dans le bain. Les autres animaux offraient au contraire une très grande résistance, et se sont peu refroidis. Aussi bien, la ténacité de leur lutte avait une autre expression consistant dans l'uniformité de leurs combustions pendant toute la durée de leur séjour dans la baignoire. Nous nous en sommes assuré par des explorations chimiques pratiquées à intervalles équidistants, pendant la durée des expériences.

Marche des combustions chez les animaux refroidis. — Le rôle des combustions apparaît clairement quand on étudie la marche qu'elles

suivent chez les animaux refroidis et faisant effort pour retrouver leur température normale. Un animal, un chien, étant refroidi par un séjour assez prolongé dans un bain froid, nous le plaçons aussitôt dans notre appareil consacré à l'exploration du chimisme respiratoire et qui nous permet de déterminer l'intensité des combustions à un moment quelconque de l'expérience. L'animal étant placé dans l'appareil, nous procédons à la mesure des échanges gazeux toutes les vingt minutes. Voici les résultats que nous avons obtenus.

Marche des combustions chez un chien refroidi.

MOMENT de l'exploration.	CONSOMMATION D'OXYGÈNE PAR HEURE ET PAR KILOGRAMME.										TEMPÉRATURE RECTALE.		
	A l'état normal.	20m après le bain.	40m	60m.	80m.	100m.	120m.	140m.	160m.	180m.	Avant le bain.	Après le bain.	A la fin de l'expérience.
Chien de 4 k. bien nourri, refroidi de 8°,7........	lit. 0,800	lit. 1,900	lit. 2,012	lit. 1,762	lit. 1,425	lit. 1,100	lit. 0,950	lit. 0,800	lit. »	lit. »	38°	29°,3	37°,5
Même chien, pesant 3k,755 à jeun du 5e jour, refroidi de 11°,4.......	0,709	1,521	1,958	1,927	1,690	1,436	1,115	1,047	0,777	0,709	38°	26°,6	38°,1

Les faits contenus dans ce tableau permettent de dégager les conclusions suivantes : chez un chien refroidi, les combustions, au début même de la régulation et dans les instants qui suivent la sortie de l'animal de son bain refroidissant, offrent un accroissement de 240 p. 100 environ. L'accroissement des combustions a la même valeur, quel que soit le degré du refroidissement, mais il se prolonge d'autant plus que ce refroidissement a été poussé plus loin, en sorte que l'excès total des combustions est proportionnel à la quantité de chaleur perdue et retrouvée par l'animal, 3°. A partir de son maximum, l'intensité des combustions décroît régulièrement jusqu'au retour de la température normale.

Les renseignements fournis par les animaux, en ce qui touche la mise en œuvre de la fonction régulatrice dans la lutte qu'ils soutiennent contre le froid, pourront être complétés par des recherches ultérieures. Mais déjà ils suffisent à mettre en évidence le moyen essentiel de la régulation thermique, c'est-à-dire l'accroissement des combustions. Cet accroissement n'a pas la mesure que nous aurions prévue, mais, comme nous le voyons, il suffit, lorsque la régulation est victorieuse, à couvrir les pertes calorifiques subies par l'animal en expérience.

Chez l'homme, l'action des bains froids a des effets très intenses que nous connaissons par les nombreux travaux de M. Lefèvre (1894, 1895, 1896, 1897). Dans ses recherches sur la chaleur animale, ce physiologiste a adopté la

méthode des bains qu'il a appliquée sur lui-même avec un héroïsme fort méritoire. Nous n'avons pas ici à faire la critique de cette méthode ni à rappeler les objections qu'elle soulève. Elle suffit largement à fournir une mesure très approchée de la chaleur produite par un animal et à déterminer les lois de la calorification. Il est, bien entendu, indispensable de noter soigneusement les changements subis par la température centrale du sujet pendant la durée de son séjour dans l'eau, de tenir compte de ses gains ou de ses pertes thermiques pour ajouter les premiers aux indications du calorimètre ou en retrancher les secondes. Nous empruntons à M. Lefèvre une de ses expériences les plus complètes et les plus fertiles en renseignements aux différents points de vue qui sont examinés dans ce paragraphe.

Marche de la thermogenèse chez l'homme dans un bain de 4°,40 (d'après Lefèvre).

TEMPS en minutes.	0'.	1'.	2'.	3'.	4'.	5'.	6'.	7'.	8'.	9'.	10.	11'.	12'.
Chaleur produite.......	cal. 0	cal. 101	cal. 145	cal. 162	cal. 179	cal. 196	cal. 213	cal. 229	cal. 245	cal. 259	cal. 273	cal. 286	cal. 298
Production à la minute.	»	101	44	17	17	17	16	16	16	14	14	13	12
Production à l'heure....	»	6060	2640	1020	1020	1020	960	960	960	840	840	780	720
Coefficients thermiques.	»	94,687	41,250	15,937	15,937	15,937	15,000	15,000	15,000	13,125	13,125	12,187	11,250
Accroissement par rapport à l'état normal..	»	1 à 68	1 à 29,4	1 à 11,3	1 à 11,3	1 à 11,3	1 à 10,7	1 à 10,7	1 à 10,7	1 à 9,4	1 à 9,4	1 à 8,7	1 à 8
Température du sujet pendant le bain......	37°,20	37°,25	37°,30	37°,40	37°,42	37°,43	37°,44	37°,45	37°,45	37°,43	37°,40	37°,30	37°,20

Nous avons dressé ce tableau en ajoutant aux renseignements fournis par l'auteur les valeurs prises par la production horaire de la chaleur et par le coefficient thermique (chaleur produite à l'heure et au kilogr.). Cela nous a permis d'évaluer l'accroissement subi par l'intensité de la thermogenèse sous l'influence du bain froid, en partant du coefficient thermique moyen de l'homme, soit $1^{cal},400$. Le sujet qui a servi dans cette expérience (M. Lefèvre lui-même) pèse 64 kilogrammes; il est très vigoureux et entraîné depuis longtemps aux différents modes de l'hydrothérapie. Ainsi complétées, les indications fournies par l'expérience sont sans doute plus expressives. Mais de toutes façons, elles nous apportent bien des enseignements. Constatons d'abord les faibles variations de la température centrale du sujet soumis au froid; elles témoignent de la perfection avec laquelle s'exécutait la régulation, en sorte que l'échauffement subi par l'eau du bain et noté soigneusement toutes les minutes fournissait à peu près immédiatement les quantités de chaleur produite au moment de l'observation. Ces quantités figurent à la deuxième colonne horizontale. On en infère, par différence, la chaleur produite d'une minute à l'autre, et on en déduit l'intensité correspondante de la thermogenèse.

Or, ce qui nous frappe et ce qui doit être retenu dans cette belle expé-

rience de Lefèvre, c'est l'intensité considérable de la thermogenèse chez l'homme pendant la duree de son immersion dans le bain froid. Abstraction faite des premières phases, sur lesquelles nous reviendrons plus bas et dans lesquelles la production et la perte de la chaleur atteignent des proportions sinouïes, l'intensité moyenne de la thermogenèse est environ dix fois plu considérable qu'à l'état normal. Cette constatation suffit pour le moment à nous faire apprécier la puissance extraordinaire et la précision que peuvent acquérir les actions régulatrices.

De la résistance au froid. Puissance thermogène. Ses degrés. — La résistance au froid ou la puissance thermogène a pour expression la limite des froids extrêmes que l'homme et les animaux peuvent supporter sans se refroidir. Nous avons indiqué plus haut ces limites, en ce qui touche l'influence des climats, mais on ne peut étudier la résistance extrême des animaux au froid que dans des expériences instituées pour cet objet. Celle de Lefèvre, que nous venons de citer, donne une idée de la puissance thermogène de l'homme et, d'une manière générale, de la résistance que les animaux peuvent opposer à l'action du froid. Le degré de cette résistance dépend d'un grand nombre de conditions, et notamment de l'habitude, de l'espèce, de l'âge, de la taille ou de l'état du tégument et de l'alimentation. Lefèvre, dans des expériences instituées sur lui-même, a bien établi l'influence de l'habitude et de l'entraînement. Il est parvenu à pouvoir supporter sans subir de refroidissement sensible des bains à 7° prolongés pendant une heure et des bains à 15° d'une durée de trois heures, ce qui lui a permis de faire de très curieuses observations sur les changements de sa température et de préciser les conditions et les lois de la régulation. Si on appelle, avec lui, coefficient de résistance, le rapport de la chaleur produite à la chaleur perdue, on voit que les variations de ce coefficient obéissent à une loi régulière et constante. Il passe par trois phases : une phase de douze à quinze minutes dans laquelle la température s'élève, en sorte que le coefficient de résistance excède légèrement l'unité ; une période de dépression, durant environ une demi-heure et dans laquelle le coefficient de résistance diminue parallèlement à la température et tombe à 0,500 environ : le sujet perd plus de chaleur qu'il n'en produit et subit un refroidissement qui fait tomber sa température. Mais la chute va bientôt se ralentissant, le coefficient de résistance se relève et redevient égal à l'unité. A partir de ce moment, la température centrale demeure stationnaire et se fixe à 36° environ : c'est le début de la troisième phase qui se poursuit jusqu'à la fin de l'épreuve. Il est intéressant de remarquer que la régulation s'exerce pendant toute la durée de cette phase sur une température inférieure à la moyenne spécifique, ce qui est une condition favorable à la résistance. Un animal qui lutte contre le froid maintient plus aisément sa température à 36° qu'il ne le ferait à 37°,5. La réserve calorifique du corps est diminuée dans la même proportion et s'entretient plus facilement. Il y a là, sans doute, un artifice favorable à la régulation. L'organisme consent un premier sacrifice, il jette du lest, pourrait-on dire. Les autres espèces animales seraient, sans doute, aussi bien douées que l'homme pour lutter contre le froid. En tout cas, elles vivent avec lui sous les climats

les plus incléments. Mais si on les soumet à l'épreuve des bains froids, on trouve de très grandes différences; d'après Lefèvre, le singe est, sous ce rapport, très inférieur à l'homme. Nous avons eu fréquemment l'occasion de constater que les chiens de grande taille luttent victorieusement contre le froid d'un bain d'eau courante qui suffit à refroidir profondément un chien de 3 à 4 kilogrammes et qui finirait par le tuer. Celui qui a servi dans notre expérience citée à la page 943 a perdu 8°,4 en vingt minutes dans un bain à 15°, et 11° en quarante-cinq minutes. Il est également très facile de refroidir les lapins et les cobayes qui résistent mal à l'influence des bains froids.

Nous constaterons simplement, sans nous y arrêter, que les animaux pourvus d'une abondante fourrure résistent plus facilement au froid extérieur que les animaux à peau nue. Un lapin rasé meurt de froid deux ou trois fois plus rapidement qu'un lapin normal. L'alimentation, d'autre part, est un facteur essentiel de la résistance, et son influence n'a pas à être démontrée. Un inanitié succomberait fatalement dans des conditions de température extérieure incapables d'effleurer la santé d'un animal convenablement alimenté. Mais de toutes les influences qui agissent sur la mesure de la résistance au froid, il en est peu d'aussi précises et d'aussi intéressantes, au point de vue de la physiologie, que celle de l'âge. On peut poser que d'une manière générale, les nouveau-nés qui naissent inachevés (et leur inachèvement s'exprime par l'occlusion des paupières et la nudité de la peau), comme le chien, le lapin, les petits oiseaux, sont incapables de résister à l'action du froid. Chez eux la fonction régulatrice n'est pas constituée, le froid ne sollicite aucun des réflexes défenseurs qui sont les agents de la régulation et de la résistance. C'est que, dans ces espèces animales, l'évolution embryonnaire n'est pas terminée au moment de la naissance, et ce qui reste inachevé surtout chez elles, c'est le système nerveux central. Il ne possède encore aucune des spécialisations essentielles par lesquelles il apportera plus tard dans tous les actes de la vie organique la discipline et la direction, l'ordre et la mesure. La fonction régulatrice met d'ailleurs très longtemps à se constituer et, dans nos recherches sur les effets du refroidissement asphyxique, nous avons vu que les jeunes animaux, chiens ou lapins, refroidis seulement de 3° ou 4°, se réchauffent très lentement, et que, loin de présenter l'exagération qui se manifeste toujours chez les adultes en pareil cas, les combustions sont moins intenses qu'à l'état normal. La régulation a exclusivement recours au réflexe vasoconstricteur. Il en résulte que la spécialisation régulatrice des centres nerveux, obéit, chez ces animaux, à une marche progressive et se fait en deux temps.

Il ne faut donc pas s'étonner de trouver, sur ce point, de graves lacunes dans le système nerveux de l'homme, au moment de la naissance. De là la disposition des nouveau-nés à se refroidir quand ils ne sont pas suffisamment protégés contre le froid. Leur fragilité à cet égard atteint son maximum lorsqu'ils sont nés avant terme. Elle constitue un danger très grave qu'on n'a pu écarter que par l'emploi des couveuses artificielles. Ce moyen de préservation a rendu les plus grands services et, d'après les relevés faits à la Maternité de Paris, on peut dire que la couveuse sauve un tiers des enfants nés avant terme (Richet).

Lutte contre la chaleur.

L'excès de chaleur dont les animaux peuvent avoir à souffrir et contre lequel ils ont à lutter, provient soit du dehors, soit du dedans. La régulation a donc à s'exercer vis-à-vis de la chaleur externe et vis-à-vis de la chaleur interne. D'une manière générale, l'organisme se défend contre la chaleur en diminuant la production et en augmentant la déperdition, mais il est bien évident que le premier procédé ne peut pas être employé vis-à-vis de la chaleur d'origine interne, comme celle qui se produit à l'occasion du travail musculaire, puisqu'il intervient lui-même dans la genèse de la chaleur importune.

La *diminution dans la production* ne peut donc intervenir que vis-à-vis de la chaleur extérieure, et ici nous retrouverions, comme instrument principal de la régulation, l'appareil musculaire dont la tonicité variable gradue l'intensité des combustions et les réduit au fur et à mesure que la température extérieure augmente. Mais nous avons vu qu'à partir d'un certain degré les combustions s'exagèrent avec la température, et la régulation est, dès lors, privée d'une de ses ressources. Mais il lui reste tous les moyens chargés de réaliser l'*accroissement dans la déperdition*. Cet accroissement est obtenu de deux manières : 1° par l'élévation de la température de la peau ; 2° par l'évaporation de l'eau, soit à la surface du tégument, soit à la surface du poumon. Ces deux effets procèdent de différents réflexes : le réflexe vaso-dilatateur cutané, le réflexe sudoripare et le réflexe respiratoire.

Réflexe cutané vaso-dilatateur. — Ce réflexe n'intervient utilement que si la température extérieure n'excède pas la température centrale, ou plutôt reste inférieure à celle de la peau. Dans le cas contraire, la dilatation des vaisseaux cutanés contribue à précipiter l'échauffement du corps en offrant aux effets de la chaleur extérieure des quantités exceptionnelles de sang (Cl. Bernard). Mais le réflexe vaso-dilatateur retrouve toute son utilité en présence, soit de la chaleur d'origine interne, soit d'une température extérieure qui, tout en étant fort élevée, ne dépasse pas celle de la peau. Dans ce dernier cas, il obéit aux impressions thermiques superficielles et dépend de lois inverses à celles que nous avons vues intervenir dans la production du réflexe constricteur. Il serait peu instructif d'ajouter qu'il peut être provoqué par les excitations électriques ou mécaniques des téguments (Heidenhain).

Le réflexe vaso-dilatateur est un effet constant de l'exercice musculaire. Il se manifeste avec une évidence particulière chez les chevaux qui viennent de fournir une course, et se trahit par la saillie des vaisseaux veineux sous-cutanés dont le réseau se dessine dans toute sa richesse. Par corrélation, la peau est brûlante et rayonne de grandes quantités de chaleur. L'excès du rayonnement cutané peut être mis en évidence chez le chien soumis à un tétanos électrique assez intense pour produire l'hyperthermie. Il suffit d'appliquer une couverture sur l'animal pour accélérer l'élévation de la température centrale. Réciproquement, dès qu'on enlève la couverture, l'échauffement de l'animal reprend sa vitesse initiale. L'expérience est particulière-

ment démonstrative si, comme nous l'avons fait, on enregistre les variations de la température centrale à l'aide d'un thermographe rectal.

Réflexe sudoripare. — Tout excès de chaleur soit interne, soit externe, produit une sudation plus ou moins intense. L'effet est aussi rapide que banal et on le voit se manifester dans une foule de circonstances, où il accompagne le réflexe vaso-dilatateur : étuve sèche, action du soleil, couvertures, boissons chaudes, travail musculaire. Il paraît dès lors oiseux de rechercher si le réflexe sudoripare peut être provoqué par la chaleur interne. Selon les causes qui le déterminent, il est tour à tour d'origine périphérique ou d'origine centrale. Disons pourtant que Luchsinger et François Franck l'ont déterminé en chauffant artificiellement le sang d'un animal. Si on chauffe directement le sang carotidien d'un chat, on voit perler des gouttes de sueur sur les pulpes digitales. Si on sectionne le sciatique d'un côté, la sudation fait défaut de ce côté, ce qui met en évidence l'intervention du système nerveux. Fredericq a déterminé la sudation d'origine centrale en provoquant l'inspiration de l'air chaud. Le sujet est placé nu dans une chambre à température moyenne (15°) et il respire à travers un tube métallique chauffé avec une lampe à alcool. De cette façon, l'air inspiré pénètre dans le poumon à une température très élevée, et peu de temps après le sujet se couvre de sueur. Mais le moyen le plus simple d'observer la sudation est d'entrer dans une étuve sèche à la température de 40°, ou de produire un travail intense.

Réflexe respiratoire. — Dès que la température extérieure s'élève, le rythme de la respiration s'accélère, et la quantité de vapeur d'eau rejetée par le poumon s'accroît dans la même mesure, exportant avec elle toute sa chaleur latente. L'évaporation de l'eau par le poumon est proportionnelle à la ventilation pulmonaire (Richet), et on conçoit que l'organisme puisse trouver dans l'accélération du rythme respiratoire un puissant moyen de lutte contre la chaleur. Ce moyen acquiert toute son importance et toute son efficacité chez les espèces animales qui ne suent pas facilement ou ne suent pas du tout, comme le chien qui, pourtant, et contrairement à une opinion fort accréditée, est pourvu de très belles glandes sudoripares. L'accélération du rythme respiratoire revêt dans ces espèces une physionomie toute nouvelle et prend les caractères d'une grande fonction, justifiant l'appellation de *polypnée thermique* que lui a donnée Richet, après en avoir démontré l'importance et la signification.

Le phénomène s'observe très facilement chez le chien, qui, dès le moindre exercice ou dès que la température s'élève, se met à respirer la gueule ouverte, la langue pendante, et accélère son rythme respiratoire au point de produire 300 et même 400 mouvements par minute. Ce mode singulier de la respiration ne pouvait échapper à l'attention des physiologistes. Ackermann, Goldstein, Fick, Gad, Mertchinsky, Silher l'ont tour à tour étudié. Mais tout en admettant que l'accélération du rythme respiratoire doit nécessairement produire un certain refroidissement du poumon, ces auteurs y voyaient surtout l'expression d'une demi-asphyxie provoquée par la chaleur et ils le qualifiaient de dyspnée thermique. Fredericq lui-même et Rosenthal ont partagé cette manière de voir qui est absolument erronée. On doit à Richet

la véritable théorie de la polypnée thermique, et ses recherches ont montré qu'il faut considérer ce phénomène comme un réflexe préposé à la régulation de la température.

Nous résumons ci-après les conclusions de cet expérimentateur :

La polypnée thermique peut être d'origine périphérique ou d'origine centrale. Elle se manifeste chez les chiens placés au soleil ou dans une étuve; elle se produit chez les mêmes animaux sous l'influence de l'exercice, comme ont pu le constater tous les chasseurs, ou du tétanos électrique, comme il est facile de s'en assurer dans les laboratoires. On peut encore la déterminer par le chauffage artificiel du sang carotidien.

Quand elle est d'origine périphérique, elle apparaît avant toute modification de la température centrale, mais elle réclame pour se produire un délai de quelques minutes consacré, sans doute, à l'échauffement de la peau. Quand elle est d'origine centrale, elle réclame l'échauffement du corps et apparaît dès que la température rectale atteint une certaine valeur qui est précisément de 41°,7.

La polypnée thermique n'est pas empêchée par la section double des nerfs vagues. Un chien névrotomisé et offrant le ralentissement caractéristique du rythme respiratoire qui accompagne la section des pneumogastriques passe progressivement et rapidement à un rythme de 300 à 400 mouvements par minute, dès qu'on l'expose à une cause d'échauffement (soleil, étuve, tétanos électrique). Les nerfs de la dixième paire sont donc étrangers au réflexe de la polypnée qui a exclusivement sa source dans les impressions thermiques et ses voies centripètes dans les nerfs sensitifs de la peau. Cette circonstance est de nature à établir que la polypnée ne se rattache pas à l'exercice de la fonction et du chimisme respiratoires.

Loin de constituer une dyspnée qui serait liée à l'imperfection des échanges gazeux de la respiration et à l'insuffisance de l'hématose, elle a pour effet d'amener la saturation du sang en oxygène et de réaliser ainsi la condition essentielle de l'apnée. C'est au point que si, sur un chien luttant contre la chaleur et en état de polypnée, on oblitère la trachée de l'animal ou si on met cet organe en communication avec un tube assez long pour faire obstacle au renouvellement de l'atmosphère pulmonaire, la polypnée n'est pas interrompue immédiatement. La fréquence du rythme se maintient pendant une minute et demie ou deux minutes pour être remplacée au bout de ce temps par la respiration asphyxique, avec l'ampleur caractéristique et la lenteur relative de ses mouvements. Il faut donc un délai inaccoutumé pour que le sang prenne les caractères du sang asphyxique et sollicite l'automatisme des centres bulbaires de la respiration, et si les limites de l'asphyxie avec ses signes extérieurs et ses moyens de défense sont ainsi reculées, c'est que précisément le sang contient un excès d'oxygène qui éloigne le moment où ses altérations éveilleront l'automatisme respiratoire.

La polypnée thermique est empêchée par les moindres obstacles mécaniques et elle cesse de se produire chez les chiens pourvus d'une muselière. Il y a là une circonstance très utile, parce qu'elle a permis à M. Richet de montrer toute l'importance fonctionnelle de la polypnée et toute la puissance

de ce moyen dans la lutte des animaux contre la chaleur. Deux chiens, dont l'un est pourvu d'une muselière, sont placés, soit dans une étuve, soit au soleil; ce dernier ne peut effectuer la polypnée et meurt au bout de 3/4 d'heure ou d'une heure avec une température centrale de 43° ou 44°. Le chien qui n'a pas de muselière se défend par la polypnée, et il se défend si bien, que sa température centrale reste invariable pendant trois ou quatre heures et conserve sa valeur normale.

La polypnée apparaît ainsi comme une fonction nouvelle et distincte, qui se constitue par un véritable emprunt physiologique, car elle prend à la respiration tous ses moyens mécaniques et physiques, sans pénétrer dans le domaine chimique de cette fonction.

Puissance réfrigérante de l'évaporation. — L'évaporation de l'eau a lieu simultanément à la surface de la peau et à la surface du poumon, et cela dans des proportions variables qui dépendent à la fois du rythme respiratoire et de l'activité des glandes sudoripares. Pour juger de l'importance de ces phénomènes, nous empruntons d'abord à Grandeau et Leclerc, les chiffres qui expriment la statique de l'eau chez le cheval, considéré tour à tour dans le repos et dans les différents modes du travail.

Tableau résumant la statique de l'eau chez le cheval, d'après Grandeau et Leclerc.

Condition de l'animal en expérience.	Eau consommée en 24 heures.	Eau rendue par les urines et les fèces.	Eau rendue par le poumon et la peau.	Proportion de l'eau évaporée.	Calories correspondant à l'évaporation.
Repos	10kil,537	7kil,804	2kil,733	25,94 p. 100	1585
Marche au pas....	11kil,557	8kil,513	3kil,044	26,34 —	1765
Marche au trot....	15kil,542	8kil,807	7kil,735	45,23 —	4486
Travail au pas....	17kil,971	11kil,361	6kil,610	36,78 —	3833
Travail au trot...	22kil,280	10kil,702	11kil,578	51,97 —	6715

En partant du coefficient thermique que nous avons assigné au cheval (1 calorie environ), on peut estimer à 10000 calories la quantité de chaleur produite et rayonnée, dans les vingt-quatre heures, par un cheval des petites voitures, le poids de ce cheval étant en moyenne de 430 kilogrammes. Les jours de travail, cette quantité s'élève dans la proportion même de la ration et devient égale à 15000 calories. Rapprochés des résultats consignés au tableau précédent, ces chiffres montrent que le rôle de l'évaporation atteint son maximum d'importance dans la condition du travail ordinaire, le travail au trot. Elle assure l'excrétion de 6715 calories sur 15000, soit environ 45 p. 100 de la chaleur totale.

A l'égard des autres animaux, on doit de précieux résultats à Richet qui a complété ses recherches sur la polypnée en déterminant, au moyen d'une balance inscrivante, les quantités d'eau perdues par évaporation. Cet expérimentateur estime que les échanges gazeux de la respiration se compensent (ce qui n'est à peu près exact que dans l'état d'inanition), et que la perte de poids subie par un animal mesure avec une approximation suffisante la perte d'eau due à l'évaporation. C'est sur cette base qu'il a déterminé le coefficient de déshydratation, c'est-à-dire le poids de l'eau évaporée par heure et par kilogramme d'animal. Ce coefficient aurait les valeurs suivantes :

Canard	au repos	3gr,6
	agité	5gr,2
	pendant la nuit	1gr,6
Lapin	au repos	1gr,75
	agité	3gr,5
Pigeon	au repos	6gr,00
	agité	12gr,00
	pendant la nuit	3gr,00
Chien	au repos	1gr,75
	agité	2gr,3
	couché	1gr,4
	en polypnée	11gr,00

Chez l'homme, le coefficient de déshydratation serait de 1 gramme, soit, pour un homme de 70 kilogrammes, une évaporation quotidienne de 1kil,680, répondant à 863 calories, ce qui représente plus du tiers de la production quotidienne de chaleur.

Limites de la résistance à la chaleur. — Mais les chiffres qui précèdent ne peuvent constituer qu'un repère ou une simple indication qui ne saurait embrasser tous les cas, et on présume bien que l'évaporation, qui est, en somme, le moyen le plus puissant de la déperdition calorifique et de la lutte contre la chaleur, atteint chez l'homme des proportions très inégales selon les cas particuliers. En tout cas, son pouvoir refroidissant est tel qu'il recule singulièrement les limites de la résistance du corps humain vis-à-vis des causes extérieures d'échauffement. On en pourra juger par les faits exceptionnels qui vont suivre.

Les premiers documents ont été recueillis par Farenheit. Plus tard, Blagden et Fordyce ont pu supporter quelques instants une température voisine de 100° en se plaçant dans une étuve *sèche* portée à cette température. Mais les premières recherches méthodiques ont été entreprises par Berger et Delaroche (1809). Ces deux expérimentateurs ont constaté sur eux-mêmes les faits suivants : Le séjour dans une étuve sèche portée de 49 à 58° devient rapidement insupportable pour Delaroche, tandis que Berger n'en est que médiocrement incommodé. Mais celui-ci n'a pu rester que sept minutes dans une étuve à 87°, tandis que Blagden, dans les tentatives précédemment indiquées, avait pu séjourner pendant douze minutes dans une étuve à 83°,3. Le mérite de Delaroche, dans ces sortes d'expériences, est d'avoir montré le rôle de l'évaporation et de la sueur qui recouvre abondamment le corps de l'homme placé dans une étuve sèche. Il vérifia d'ailleurs la justesse de son interprétation dans des expériences méthodiquement conduites et par lesquelles il fit voir que des températures beaucoup moins élevées que celles qui précèdent sont intolérables pour l'homme quand l'étuve contient de l'air saturé de vapeur d'eau, et deviennent rapidement mortelles pour les animaux qu'on y maintient. Les nombreuses expériences qu'il a poursuivies de ce côté ressortissent surtout à la physique et nous n'avons pas à les retenir ici. Il nous suffira de rappeler qu'il a eu le mérite de l'initiative, et qu'on lui doit la théorie de l'évaporation comme moyen de régulation et de résistance à la chaleur. Son interprétation était d'autant plus remarquable, qu'elle venait à l'encontre des théories purement vitalistes proposées par Fordyce et Blagden.

CHAPITRE VIII

DE LA CHALEUR CONSIDÉRÉE COMME CONDITION EXTERNE DES PHÉNOMÈNES DE LA VIE

Action de la chaleur et du froid sur les êtres et les tissus vivants.

Les manifestations de la vie, en tant que modes de l'activité et de l'énergie vivante, se rattachent toujours à des réactions chimiques, qui sont la source originelle de l'énergie transformée par les êtres vivants. C'est à ce point de vue que la vie est vraiment une fonction chimique, et qu'à ce titre elle est placée sous la dépendance de la chaleur extérieure.

Toute réaction chimique réclame en effet pour s'accomplir une certaine quantité de chaleur. Elle constitue un travail moléculaire dans la production duquel se trouve engagée primitivement une dépense inévitable de chaleur, c'est-à-dire la dépense d'un travail que M. Berthelot a appelé le *travail préliminaire*. On aperçoit là l'intervention d'une loi générale qui s'étend aux êtres vivants et qui domine les actions chimiques dont ils sont le siège. Et, de même que, dans les laboratoires ordinaires, l'intensité des réactions chimiques augmente avec l'intensité du foyer de chaleur qui les détermine, de même, dans les laboratoires vivants, l'intensité des phénomènes chimiques de la vie augmente avec la température.

Par corrélation, les manifestations de la vie elle-même subissent une variation parallèle. De là résultent ces fluctuations bien connues de la végétation qui s'engourdit en hiver pour reprendre son essor au printemps et s'épanouir librement en été. De là aussi l'inégale répartition des végétaux dont le nombre et la variété vont en s'épuisant, au fur et à mesure qu'on s'élève à des altitudes plus hautes ou qu'on se rapproche de latitudes plus voisines des pôles.

Les animaux n'échappent pas à cette loi ni à cette influence, et si on prend pour témoin du chimisme vital les combustions respiratoires, on constate que leur intensité s'élève progressivement avec la température extérieure. A 0°, une grenouille peut être privée d'oxygène pendant deux jours, mais elle succombe en quelques minutes si la température est à 30° (Regnault et Reiset).

Mais ici il faut s'arrêter devant les différences graves qui séparent sur ce point les hétérothermes et les homœothermes. On voit, par l'expérience de Regnault et Reiset, que, chez les premiers, l'intensité des phénomènes chimiques de la vie subit toutes les fluctuations de la température extérieure et varie dans le même sens. Au contraire, les homœothermes règlent l'intensité de leurs combustions en sens inverse de la température extérieure, et c'est précisément grâce à ce pouvoir de régulation qu'ils peuvent fixer leur température propre à un degré invariable et s'affranchir ainsi de l'influence immédiate de la chaleur extérieure. Par là, ils obtiennent le privilège d'une vie

uniforme et *continue*, parce qu'elle reste sous la dépendance d'un milieu artificiel, mais invariable au point de vue thermique. Par opposition, les hétérothermes vivent plus ou moins selon que la température extérieure est plus ou moins élevée. Ils reflètent toutes les fluctuations de la température, et l'intensité de leur vie alterne avec les saisons. Elle a des minima où elle est comme suspendue ou latente, et des maxima où elle atteint son apogée. En un mot, elle est *discontinue* (Cl. Bernard).

Mais ces considérations générales doivent maintenant se préciser dans des faits plus particuliers, qui trouveront place dans les paragraphes suivants.

Des limites extrêmes de la température compatibles avec l'existence. — Limites supérieures. — A cet égard, il faut distinguer les animaux à sang chaud et les animaux à sang froid; chez les mammifères et les oiseaux, les manifestations de l'irritabilité atteignent leur maximum de puissance pour une température optima qui est précisément celle de leur corps et qui varie entre 37°,5 et 43°. Cette température optima est très voisine de la température mortelle, qui est en moyenne de 45° pour les mammifères et de 50° pour les oiseaux. De ce côté, les vertébrés à sang froid sont encore plus intolérants, car ils succombent à 40° à peu près.

Ces limites sont communes à la presque universalité des êtres vivants, car elles répondent à des propriétés générales du protoplasma qui ne survivent pas à l'influence de ces températures extrêmes.

On connaît pourtant des exemples authentiques de résistance exceptionnelle, offerts par certaines espèces d'algues et par les microbes. Dans le premier groupe, nous citerons les observations de Cohn, d'Ehremberg, de Hoppe-Seyler qui ont fait connaître des algues vivant dans des sources thermales dont la température atteignait 55°. On doit aussi à M. Richet la connaissance des sulfuraires de Luchon qui vivent dans une eau dont la température n'atteint pas moins de 70°. Ces sortes de faits ont été pour Dollinger l'occasion de très belles expériences dans lesquelles il s'est attaché à produire l'accoutumance des algues à la chaleur par une éducation prolongée. C'est ainsi que, par un entraînement progressif qui a duré plus de quatre ans, des plantes appartenant au groupe des *Flagellariées*, et qui vivaient normalement dans l'eau à 15°, sont arrivées à vivre dans l'eau à 70°. Il devient, par là même, inutile de s'arrêter aux objections de Schultze soutenant que le protoplasma végétal se coagule toujours de 42 à 47 degrés.

Aussi bien, l'ensemble des faits recueillis sur les microbes mettent hors de doute la résistance du protoplasma végétal dans certains cas. C'est ainsi que les microcoques ne sont tués qu'à 60° ou 70° ; que les bacilles asporulés meurent entre 70° et 80°. Et quant aux bacilles sporulés et à leurs spores, il ne faut pas moins d'une température de 110° ou 120° pour les détruire. C'est sur ces notions précises que repose précisément la pratique de la stérilisation si communément employée dans le domaine de la bactériologie et de la chirurgie.

Limites inférieures (basses températures). — De ce côté, nous allons rencontrer des inégalités plus grandes. Les mammifères et sans doute aussi les oiseaux succombent, en général, dès que leur température propre est tombée

à 20° environ. Les vertébrés à sang froid sont beaucoup plus tolérants à l'égard des basses températures. A 0°, ils ne sont qu'engourdis, et leurs manifestations vitales sont seulement suspendues; mais ce n'est pas là la limite extrême de leur résistance, car, contrairement aux assertions de Pouchet, ils peuvent résister à la congélation. Il résulte, en effet, des récentes recherches de Raoul Pictet, que des poissons, des grenouilles, des serpents ont pu être impunément refroidis à des températures de — 15° à — 30°. Les œufs sont également très résistants, mais à des degrés variables. Ceux des oiseaux supportent la congélation, mais ils sont tués entre — 1° et — 2°. Par contre, ceux des grenouilles peuvent évoluer et éclore après avoir subi un froid de — 20°. On trouve des inégalités du même ordre chez les insectes. Alors que les œufs des fourmis sont tués à — 1°, ceux des vers à soie résistent à — 40° et donnent des larves exemptes de maladies parasitaires. Les protozoaires sont tous très résistants. Ainsi, les diatomées, les microbes, les spores de toute sorte défient les froids les plus intenses qui aient pu être réalisés par M. Pictet, et survivent à un refroidissement de — 200°. Les graines végétales se comportent de la même manière, en dépit de leur organisation relativement élevée. La raison cachée de toutes ces inégalités n'apparaît pas clairement, et on ne voit pas de relation saisissable entre le degré de l'organisation et l'action destructive que le froid exerce sur elle.

Action de la chaleur et du froid sur les tissus vivants et sur les éléments anatomiques. — Dans les développements qui précèdent, nous avons surtout considéré les réactions de l'organisme total vis-à-vis de la chaleur et du froid. Il convient, maintenant, d'examiner celles des éléments anatomiques et des tissus. Relativement à la cellule, les observations de Nœgeli, Schultze, Kuhne, peuvent se résumer dans une loi générale : L'irritabilité de la cellule s'accroît de 0° à 40 ou 45°. A la limite inférieure, c'est-à-dire à 0°, les manifestations de la vie cessent dans le protoplasma cellulaire, comme elles cessent d'ailleurs chez tous les êtres vivants. A cette température, le protoplasma s'immobilise dans la forme sphérique et subit ce que les auteurs allemands appellent la *rigidité frigorifique* [*Kaltestarre* (Pickford, Kuhne)]. Nous venons de voir que chez les êtres inférieurs cette rigidité n'est pas l'expression de la mort. Pour être suspendue, l'irritabilité n'est pas éteinte, et elle se manifestera de nouveau si la température se relève. Pour cette catégorie d'êtres ou d'éléments, la rigidité frigorifique ne tue pas (Hofmeister, Kuhne, Pictet), et la congélation elle-même n'entraîne la mort que si elle a lieu dans des vases hermétiquement clos, parce que, dans ces conditions, elle est accompagnée d'une pression énorme, insupportable pour le protoplasma (Madeuf).

A la limite supérieure, le protoplasma subit la *rigidite calorifique* ou *Warmestarre* des auteurs allemands. Nous aurons à préciser bientôt le sens de ce mot.

Il existe donc un minimum et un maximum de température qui produisent la rigidité du protoplasma. Mais entre ces deux termes se place un degré de température optima pour lequel l'irritabilité atteint son maximum et qui est d'ailleurs très voisin du terme supérieur. Tel est l'ensemble des conclusions

qui se dégagent des nombreuses observations dirigées sur les diverses formes de la cellule (cellules végétales, amibes, leucocytes, spermatozoïdes, etc.).

Mais le meilleur objet d'études, et le plus intéressant, est le cœur, parce qu'il peut être aisément isolé et donner spontanément un témoignage de l'irritabilité dans un élément fondamental de l'organisation, la fibre musculaire. Cyon a recherché les effets de la température sur le cœur des vertébrés à sang froid, en appliquant au cœur de la grenouille le dispositif introduit par Ludwig pour faire agir sur cet organe une circulation artificielle. Il a vu ainsi que pour la grenouille le rythme et la force des battements du cœur s'accroissent à partir d'un minimum compris entre 0° et 4° jusqu'à un maximum de 40°. En deçà ou au delà de ces limites, le cœur arrête ses battements et s'immobilise dans une rigidité mortelle. Il est vrai qu'à l'aide d'une autre méthode, consistant à immerger le cœur dans l'eau salée plus ou moins chaude, Aristow est parvenu à reculer quelque peu les limites du maximum intolérable. De même, en employant des injections chaudes intra veineuses, Athanasiu et Carvalho ont vu que le cœur de la tortue peut supporter des températures beaucoup plus élevées. Dans une de leurs expériences, cet organe a toléré, pendant dix-neuf secondes, une température variant de 50°,4 à 50°,98. Une autre fois, il a subi, pendant vingt-quatre secondes, une température de 48°,6 sans présenter d'autre trouble qu'une accélération énorme du rythme.

On a, d'autre part, recueilli de précieux résultats sur le cœur des homœothermes. En essayant de préciser les limites de la température incompatibles avec la vie, pour les vertébrés, Cl. Bernard avait fixé aux valeurs suivantes le maximum mortel pour le cœur : 43° à 45° chez les mammifères et 45° à 48° chez les oiseaux. C'est d'ailleurs sur ces observations qu'il a fondé sa théorie du mécanisme de la mort par la chaleur, théorie fort contestée aujourd'hui et sur laquelle nous aurons à revenir. Mais le cœur des mammifères a été également observé dans les conditions d'isolement déjà réalisées pour celui de la grenouille. C'est ainsi que Newel Martin (1883) a étendu aux mammifères les recherches instituées par Cyon sur la grenouille avec la méthode de Ludwig.

Or, le cœur du chien, complètement séparé de tous les organes, sauf du poumon, et parcouru par une circulation artificielle, supporte des températures dont le minimum est 16°,5 et le maximum 44°. L'optimum varie, avec les individus, de 40°,6 à 43°,3. Les limites mortelles sont 16° et 45°. Langendhorff et Nawrocki opèrent sur le cœur totalement isolé et suspendu dans un vase ouvert à l'extérieur. Ils ont vu ainsi que le rythme des battements croît de + 7° à un maximum compris entre 44° et 46°. A ces limites, la fréquence des battements est extrême et peut atteindre jusqu'à 300 pulsations par minute. Par contre, à 7°, le rythme ne comptait plus qu'une pulsation toutes les cent secondes. Il en résulte que les limites de la température supportables pour le cœur du chien se trouveraient comprises entre un minimum de 6° à 7° et un maximum de 45 à 47 degrés.

Par la méthode des injections chaudes intra veineuses, Athanasiu et Carvalho ont pu surprendre dans le ventricule droit du chien une température de 55° à 60° qui fut tolérée pendant quelques instants sans entraîner la mort.

Mais le cœur est un muscle spécial, et il est intéressant de rechercher les réactions des autres muscles vis-à-vis de la chaleur et du froid. On sait depuis longtemps, par les expériences de Helmoltz (1860), de Marey (1868), que l'irritabilité des muscles augmente avec la température. Les imbrications obtenues par ce dernier auteur, sur des muscles de grenouille soumis à l'influence d'un courant d'eau de température croissante, mettent bien en évidence les changements correspondants de l'irritabilité. Quand le muscle est soumis à un courant d'eau chaude, les secousses deviennent de plus en plus brèves et offrent une amplitude croissante. Sous l'influence du froid, on voit apparaître des caractères inverses : l'amplitude des secousses diminue et leur durée augmente. Mayer (1886-1887) a étendu aux muscles des mammifères les observations qui précèdent, et, de plus, il a mis en évidence une expression particulière de l'excitabilité ; nous voulons parler de la période d'excitation latente, dont la durée augmente avec le froid et diminue avec la chaleur. Mais il est nécessaire d'ajouter des précisions sur la valeur des limites extrêmes de température compatibles avec l'irritabilité et la vie des muscles. Edwards (1887), faisant agir une température croissante sur les gastro cnémiens de la grenouille, a constaté les phases suivantes :

A 36°,5, le muscle produit ses plus belles contractions;
A 37°,5, il entre en tétanos;
A 38°, il perd son irritabilité ;
A 40°, il est immobilisé dans la rigidité calorifique.

La rigidité n'est pas un phénomène soudain, et il suffit de jeter les yeux sur les imbrications obtenues par Marey pour constater qu'au voisinage de la température mortelle le muscle ne revient pas à sa longueur initiale, et que chacune de ses contractions le laisse de plus en plus raccourci ; on voit ainsi que sous l'influence de la chaleur et pendant la série des excitations qui sollicitent ses secousses, le muscle subit un raccourcissement progressif tout à fait indépendant de son activité. Le même phénomène se retrouve dans les observations de Schmulewitsch et Sanckowy, vérifiées par Gotschlich. De 28° à 35°, le muscle entre dans une phase de raccourcissement, après laquelle on peut lui faire reprendre sa longueur normale en abaissant la température. A partir de 35° commence une deuxième phase où le raccourcissement atteint son maximum de 45° à 50° et devient, cette fois, irrémédiable. Le muscle est mort et ne peut pas reprendre sa longueur normale. En continuant à chauffer, on obtient un dernier raccourcissement entre 60° et 70°.

Nature de la rigidité calorifique. — Ces faits vont nous permettre de choisir avec certitude parmi les théories émises sur la nature de la rigidité calorifique. On voit clairement que ce phénomène a des degrés, et qu'au moment de la mort du muscle, à 40° chez la grenouille, à 45° chez les mammifères, il constitue le terme fatal d'une altération progressive qui a commencé déjà depuis longtemps et qui finit par tuer le muscle. Nous ne saurions donc y voir une forme de l'activité comme le veut Engelmann et nous la considérons comme une altération purement chimique. Kuhne expliquait

la rigidité par la coagulation de la myosine ; il faut bien renoncer à cette interprétation, puisque la coagulation de la myosine n'aurait lieu qu'à 60° et que, d'ailleurs, Kuhne aurait confondu ce phénomène avec la coagulation spontanée du suc musculaire. Mais il reste vrai que le muscle meurt à 45° en raison des altérations chimiques qu'il a subies, et si la rigidité calorifique n'exprime pas la coagulation de la myosine, elle exprime évidemment la coagulation du muscle, et cela nous suffit.

Il n'y a donc pas lieu de retenir autrement les théories physiologiques de la rigidité, d'autant moins que le raccourcissement qui aboutit à ce phénomène se poursuit après la mort du muscle, si on continue à le chauffer. Pour les mêmes motifs, nous repoussons l'expression de contracture thermique réservée par Gotschlich pour désigner le raccourcissement qui précède la mort. Ce raccourcissement, nous l'avons vu, est indépendant de l'activité du muscle, et il trahit simplement une altération chimique qui n'est pas encore irrémédiable et qui n'a pas épuisé tous ses effets. Nous concluons que le muscle est tué chimiquement par la chaleur à 45°. Il est infiniment probable que la rigidité calorifique est un phénomène général, et que l'altération du protoplasma tué par la chaleur conserve les mêmes caractères essentiels pour toutes les formes cellulaires. Il n'y a de différences que dans les degrés de la température extrême qui produit la rigidité.

En ce qui touche les éléments du système nerveux, les documents font à peu près défaut pour les cellules. En revanche, ils sont relativement très nombreux pour les nerfs. Nous rappellerons, tout d'abord, l'expérience de Cl. Bernard, à l'aide du soléaire de la grenouille. Tout le membre postérieur d'une grenouille est plongé dans un bain d'huile à 45°, à l'exception du muscle soléaire, préalablement détaché de son insertion inférieure, et soustrait à l'action du bain. Tous les autres muscles ont subi la rigidité calorifique et ont été tués par la chaleur, mais le soléaire préservé demeure un témoin de l'état des nerfs plongés dans le bain chaud. Or, pour toutes les excitations du sciatique, le soléaire répond par une contraction, et il faut en inférer que les nerfs moteurs survivent aux muscles, et ne sont pas tués par une température de 45°. La température mortelle pour ces nerfs est d'ailleurs très élevée. Elle serait comprise entre 50° et 65° d'après Afanassief. Dans les expériences d'Albertoni et Stefani, l'irritabilité des nerfs moteurs de la grenouille disparaît à 0° et à 50°. Elle s'accroît de 0° à 45°, d'après Sobieransky.

Les limites inférieures ne sont pas aussi éloignées chez les mammifères, car sur le sciatique du chien l'irritabilité motrice disparaîtrait à 6°, et l'irritabilité sensitive à 10° (Grutzner, 1878).

On voit que les nerfs sensitifs offrent moins de résistance que les nerfs moteurs, et cette différence n'avait pas été méconnue par Cl. Bernard, à qui on doit une expérience montrant qu'après son immersion dans un bain d'huile à 36°, le membre postérieur d'une grenouille devient complètement insensible, tandis que l'autre membre, conservé comme témoin, répond à toutes les excitations. La chaleur agirait donc comme un anesthésique. A cet égard, son influence se manifeste de la manière la plus inattendue dans

la saisissante expérience de Pflüger dans laquelle une grenouille, placée dans un bain dont on élève lentement la température, peut arriver à la cuisson sans produire aucun mouvement et sans donner aucun témoignage de sensibilité.

En ce qui touche les éléments figurés du sang, les températures mortelles sont également très éloignées : les leucocytes meurent à 0° et à 45°-50° (Schultze). Il est vrai que, pour Maurel, la limite des températures élevées est plus prochaine, car, d'après cet observateur, les leucocytes de l'homme seraient tués vers 44°-45°. Les leucocytes de la grenouille supportent la congélation, mais ils subissent la rigidité calorifique vers 38°-42°. Les hématies abandonnent leur hémoglobine par la congélation, mais elles subissent impunément des températures très élevées, 50° à 60°, d'après Schultze.

Les documents qui viennent d'être groupés dans le précédent paragraphe, nous seront bientôt fort utiles quand nous étudierons les théories émises pour expliquer la mort par le froid et par la chaleur.

Effets de l'hypothermie et de l'hyperthermie.

Causes de la mort par le froid et par la chaleur.

Lorsque les causes d'échauffement ou de refroidissement dépassent les ressources de la régulation, la température centrale des animaux s'élève, c'est l'hyperthermie, ou elle s'abaisse et constitue l'hypothermie. L'animal subit alors l'influence du chaud ou du froid internes, et il finit par succomber. Ce sont les diverses circonstances de cette lutte inégale des animaux contre le froid et contre la chaleur qu'il convient maintenant d'examiner.

Des effets de l'hypothermie ou du froid interne. — En présence d'un froid excessif, les homœothermes deviennent incapables de compenser la déperdition qui leur est infligée, et ils se refroidissent avec une rapidité variable. Nous avons vu précédemment qu'ils succombent aux effets du froid dès que leur température centrale est descendue à 20° environ. Ce n'est que par exception qu'on a observé des températures plus basses chez des mammifères vivants. Nous citerons, notamment, le cas d'un lapin observé par Richet et dont la température centrale était tombée à 15°. Valter a observé, d'autre part, une température de 9° sur un lapin vivant. Horwart a pu ramener à la vie de jeunes animaux qui s'étaient refroidis jusqu'à 5°. Il est vrai que, par la tolérance de leurs tissus, les jeunes se rapprochent, à certains égards, des animaux à sang froid, et on peut poser comme une loi, que la résistance au froid (interne) est d'autant plus grande que la régulation est plus imparfaite.

L'action physiologique de l'hypothermie présente deux phases : 1° une phase d'excitation pendant laquelle les combustions restent très exagérées et témoignent de la lutte que l'animal soutient vainement contre le froid; 2° une phase de dépression caractérisée par l'abaissement progressif des combustions respiratoires. Il existe donc un degré du refroidissement pour

lequel les animaux perdent la faculté de lutter contre le froid et à partir duquel l'intensité des phénomènes chimiques de la vie décroît avec leur température. A dater de ce moment, l'animal à sang chaud est très analogue à un animal à sang froid, et, par cela seul qu'il a perdu l'exercice de la fonction régulatrice, l'intensité des phénomènes chimiques de la vie dépend exclusivement, chez lui, de la température extérieure.

De la température critique. — Nous désignons précisément par cette expression la limite de la température propre au-dessous de laquelle les homœothermes perdent l'exercice de la fonction régulatrice. En ce qui touche sa valeur, nous avons fait les observations suivantes : Des lapins refroidis à 24° par l'action de l'eau ou par privation d'oxygène sont incapables de se réchauffer spontanément. Ils continuent à se refroidir et il faut les mettre à l'étuve si on veut les empêcher de mourir. Refroidis à 28° ou 29°, ils se réchauffent spontanément. De même, un chien, dont la température a été abaissée à 26°,6, s'est réchauffé en moins de trois heures. On peut donc présumer que les animaux ne perdent l'usage de la fonction régulatrice que lorsque leur température est descendue à 25° environ.

La valeur de la température critique est sans doute variable, comme on peut en juger déjà par les chiffres ci-dessus, et comme on en jugera encore par ceux des différents auteurs. Mayer l'estime comme nous à 25°. D'après Quinqnand, elle oscillerait entre 28° et 32°. Enfin, pour Wilhem Welter, l'intensité des combustions commence à diminuer chez les animaux dont la température est descendue à 33°. Ce chiffre est assurément trop élevé.

Causes de la mort par le froid. — On a vu dans le paragraphe précédent que les tissus des homœothermes perdent leur irritabilité à une température supérieure à 0° (20° environ). On s'explique donc que ces animaux succombent aux effets du froid beaucoup plus tôt que les hétérothermes. Chez ces derniers, le zéro vital, pour employer la très juste expression de Richet, se confond avec le zéro physique. Chez les homœothermes, le zéro vital est compris entre 15° ou 16°. Mais, si on se rappelle les chiffres que nous avons donnés précédemment, il excède de quelques degrés le zéro vital des éléments anatomiques et des tissus essentiels. Par exemple, on a vu le cœur battre à 7°. Mais on conçoit que, pour n'avoir pas encore perdu toute leur irritabilité, les tissus refroidis soient dépossédés d'une grande partie de leurs aptitudes et ne remplissent pas toutes leurs fonctions. Ils sont d'ailleurs inégalement frappés, et la désharmonie autant que l'insuffisance de leurs actes entraîne la mort. Mais, en dehors de ces considérations, on peut admettre une hiérarchie dans la déchéance des divers tissus, et si la défaillance primitive porte sur un système investi d'attributions essentielles, cette défaillance entraîne avec elle toutes les autres. Dans cet ordre d'idées, le système nerveux central appelle toute notre attention. Si nous considérons la marche des phénomènes chez un animal soumis à un refroidissement progressif, nous serons tout près de croire que la mort par le froid est due, sinon à la mort des centres nerveux, du moins à leur incapacité fonctionnelle.

La déchéance du système nerveux s'exprime en effet très clairement chez les mammifères mourant de froid. L'animal présente des apparences larvaires,

il est immobile ou ne produit que des mouvements rares et d'une extrême lenteur; sa sensibilité, d'abord simplement émoussée, finit par disparaître, au point que le réflexe cornéen lui-même cesse de se produire ; les battements du cœur sont faibles et lents, les mouvements respiratoires sont rares, sans ampleur et interrompus par des pauses passagères. Ce qui domine dans un pareil tableau, c'est la défaillance du système nerveux, et il apparaît bien que le froid agit à la fois comme un narcotique et comme un anesthésique. Aussi bien, parmi les symptômes relevés par les médecins militaires, chez les soldats morts de froid pendant la campagne de Russie, figurent en première ligne : la diminution de la sensibilité, l'accablement des forces et surtout un besoin invincible de sommeil qui a raison des volontés les plus robustes. Ceux-là mêmes qui emploient toute leur force morale à lutter contre ce besoin, finissent par y succomber et la mort les surprend dans un sommeil léthargique.

Dès lors, il nous paraît inutile de rechercher, avec M. Ansiaux, si les animaux refroidis meurent par le cœur ou par le thorax. Il y a toujours une syncope cardiaque ou une syncope respiratoire au bout de toutes les agonies, et la question ne doit pas se poser ainsi. Il s'agit de savoir quel est le tissu qui est primitivement frappé par le froid. Or, tout permet de penser que c'est celui des centres nerveux.

Il ne faut pas oublier d'ailleurs que la dépression produite par le froid n'entraîne aucune altération organique irrémédiable, et si proche, si menaçante que soit la mort chez un animal que le froid a privé de toute sensibilité et de toute motricité, on peut la prévenir et ramener l'animal à la vie par un réchauffement artificiel. Tant que le cœur bat, un refroidi peut être sauvé.

Des effets de l'hyperthermie. — L'hyperthermie intervient toutes les fois que les causes d'échauffement excèdent les ressources de la régulation, et le meilleur moyen d'en étudier les effets est de soumettre les animaux à l'influence d'une température très élevée en les plaçant dans des étuves. On a vu plus haut l'initiative de Delaroche. Mais les recherches de cet expérimentateur ont été reprises beaucoup plus tard, par Cl. Bernard, dans de meilleures conditions, et ont donné des résultats plus complets. Aussi est-il nécessaire de résumer de ce côté l'œuvre de l'illustre physiologiste. En ce qui touche l'influence de la chaleur sèche, les animaux ne peuvent pas vivre en présence d'une température plus élevée que celle de leur corps. Leur résistance est en raison directe de leur masse et en raison inverse de la température. Entre 90° et 100°, par exemple, les mammifères et les oiseaux succombent après six minutes ou dix-huit minutes de séjour dans l'étuve. L'action de la chaleur humide est beaucoup plus rapide :

A 80°	un lapin succombe en.............	2 minutes.
A 60°	—	3 —
A 45°	—	10 —

Ce nous est l'occasion de remarquer qu'*à fortiori* l'influence des bains chauds est bien plus puissante. Ils deviennent rapidement intolérables dès

que leur température excède celle du corps et ils provoquent d'autant plus sûrement la mort que leur action thermique est plus prochaine et que la plupart des actions régulatrices sont empêchées par le mode d'application de la chaleur. Le maximum de température tolérable, passagèrement, est de 44°, et ce n'est pas sans surprise qu'on apprend que Bonnat prétend avoir pu séjourner quinze minutes dans un bain à 46 degrés.

Quel que soit le mode par lequel s'exerce l'influence de la chaleur extérieure, elle agit toujours par l'intermédiaire de la circulation qui en répartit et en propage rapidement les effets dans tout l'organisme. Toute la chaleur empruntée au dehors par le liquide sanguin en mouvement dans les vaisseaux cutanés ou pulmonaires est emportée aussitôt dans la profondeur des tissus et uniformément distribuée dans tous les points du corps. On voit ainsi que, loin d'intervenir dans la défense de l'organisme, comme elle le fait dans le cas d'hyperthermie d'origine interne, la circulation multiplie les effets de la chaleur extérieure et accélère la vitesse de l'échauffement du corps. C'est pour cette raison, si bien mise en évidence par Cl. Bernard, que le cadavre d'un animal mort, placé dans une étuve, en même temps qu'un animal de même poids et de même espèce, s'échauffe beaucoup plus lentement que ce dernier. C'est encore pour ce motif que, placés dans les mêmes conditions de température, les oiseaux périssent plus rapidement que les mammifères et que les mammifères meurent plus tôt que les animaux à sang froid. Les phénomènes marchent d'autant plus vite que la circulation est plus active.

La pathogénie des effets mortels de la chaleur est dominée par ce fait capital dû à Cl. Bernard : les animaux surchauffés succombent dès que leur température centrale atteint un degré déterminé à peu près constant pour chacun des grands groupes auxquels ils appartiennent. Le degré de la température mortelle est de 45° à 50° pour les oiseaux, 43° à 45° pour les mammifères et 38° à 40° pour les vertébrés à sang froid (grenouille). Ces limites de l'échauffement mortel restent invariables, quels que soient les modes d'application de la chaleur et son intensité. Elles suffisent donc à préciser la condition nécessaire et suffisante de la mort par la chaleur. Le problème se circonscrit, mais il ne peut être abordé fructueusement qu'après l'examen des symptômes et des lésions qui accompagnent l'hyperthermie.

Symptômes et lésions de l'hyperthermie. — Sur ce point, les nombreuses observations de Cl. Bernard, et plus tard celles de Vincent, sont absolument concordantes. L'animal soumis à l'influence de la chaleur ne témoigne d'abord d'aucun malaise et semble demeurer indifférent ; mais, dès que l'hyperthermie s'accuse, il donne les signes de la plus vive agitation et les erandes fonctions s'exagèrent. Les battements du cœur et les mouvements respiratoires s'accélèrent et finissent par s'exécuter avec une fréquence exceptionnelle. Par une corrélation qui trahit le trouble de la fonction régulatrice, les combustions respiratoires, dont on aurait pu présumer l'abaissement, s'exagèrent au contraire de la manière la plus sensible (Colasanti, Pflüger, Vincent, Quinquaud), et parviennent à leur maximum quand l'hyperthermie atteint 44°. Cependant, l'agitation s'apaise et, aux approches

de la mort, l'animal entre dans une période de coma et d'anesthésie que viennent interrompre des crises momentanées de spasmes convulsifs et de contractures plus ou moins étendus. Tout à coup et au milieu d'un accès convulsif, l'animal pousse un cri et tombe, foudroyé par une mort subite, qui le surprend dans les attitudes les plus étranges.

L'autopsie donne des résultats constants. Quelque diligence qu'on apporte à faire l'ouverture du thorax, on trouve toujours le cœur immobile, globuleux et *rigide*, et tout semble faire admettre que c'est la brutale cessation de ses mouvements qui a déterminé la mort subite. Le sang se coagule difficilement; il est fluide et aisément diffusible, comme le prouvent les épanchements et les ecchymoses disséminés dans le tissu conjonctif sous-cutané et dans les divers viscères. Il est très noir et on pourrait croire que l'hémoglobine a perdu ses propriétés. Mais la veinosité du sang des animaux surchauffés est un caractère *post mortem*, et si on recueille ce liquide sur le vivant, quelques instants avant la mort, on constate que, mis en présence de l'air, il fixe abondamment l'oxygène (Cl. Bernard).

Les muscles sont rigides et inexcitables comme le cœur, et c'est dans ce double caractère, dans cette double lésion, que se manifeste l'action élective exercée sur l'organisme par les températures mortelles. Il semble que la chaleur procède ainsi à la façon des substances toxiques et médicamenteuses, par une altération locale atteignant primitivement une seule catégorie d'éléments anatomiques.

Causes de la mort par la chaleur. — Si on considère, d'autre part, que tous les autres tissus de l'organisme survivent aux muscles et au cœur, et que les animaux meurent précisément à l'instant où leur température centrale atteint le degré mortel pour les muscles et pour le cœur, on admettra sans résistance la théorie de Cl. Bernard professant que l'hyperthermie tue les animaux par le cœur. C'est la *théorie musculaire*. Cette théorie a soulevé, depuis, bien des objections. On a fait un grief à Cl. Bernard d'avoir adopté l'explication chimique fournie par son élève Kuhne, sur la nature de la rigidité calorifique. Mais c'est un point dépourvu de toute importance, et il suffit de savoir que la rigidité musculaire et cardiaque, quelle que soit sa nature, entraîne l'incapacité fonctionnelle et se produit environ à 45°. Il est vrai que dans bien des circonstances, les animaux surchauffés meurent à 44° et même à 43°. Mais nous ne savons pas du tout qu'elle est la température du cœur à ce moment, et il y a bien des chances pour quelle soit supérieure à celle du rectum. Il est vrai encore que le cœur des animaux tués par la chaleur n'est pas constamment inexcitable après la mort (Jolyet); mais, dans les autopsies de Cl. Bernard, ce caractère n'a jamais fait défaut, et, d'autre part, il ne suffit pas que l'on puisse trouver des traces d'irritabilité dans le cœur pour en inférer qu'il suffisait à sa tâche au moment de la mort.

On a invoqué enfin la tolérance du cœur à l'égard de températures supérieures aux températures mortelles pour l'organisme, et on a opposé aux dans conclusions de Cl. Bernard les observations, racontées plus haut, de Langendhorff et Nawrocki, et surtout celles d'Athanasiu et Carvalho,

lesquelles le cœur a pu, très passagèrement, supporter sans mourir des températures de 46° et même de 55° à 60°. Mais on oublie celles de Newel Martin, non moins rigoureuses que ces dernières, et dans lesquelles on a toujours vu le cœur du chien entrer en rigidité quand sa température atteint 45°-46°. Et puis, il faut réfléchir que les effets de la chaleur ne sont pas soudains et qu'ils dépendent en grande partie de la durée. Aristow, dont nous avons rappelé plus haut les recherches et la méthode, a vu que, s'il ne faut que dix secondes pour tuer le cœur d'une grenouille à 65°, il en faut trois cent soixante pour obtenir le même résultat à 40°. On peut donc présumer que les températures exceptionnellement élevées, que l'on dit inoffensives pour le cœur, ne le sont que pour les limites de temps où elles ont exercé leur influence.

En tout cas, si la chaleur ne tue pas les animaux par le cœur, elle ne les tue pas par une action exercée visiblement sur d'autres points. Tous les autres tissus survivent au cœur, et, de ce côté, les vues de Cl. Bernard ont été pleinement confirmées. Il nous suffira, pour l'établir, d'examiner sommairement les diverses théories qu'on a préférées à celle de Cl. Bernard :

Théories sanguines. — Le sang est décidément hors de cause, puisque les hématies ne sont détruites qu'entre 50° et 60° (Schultze), et puisqu'enfin, à la température de 45°, mortelle pour les mammifères, elles conservent la plénitude de leurs propriétés physiologiques, et que, notamment, leur capacité respiratoire est intacte. Contrairement aux assertions de Mathieu et Urbain, qui avaient opéré sur le sang, après la mort, Vincent a montré que chez l'animal encore vivant, mais tout près de mourir par la chaleur, la teneur du sang en oxygène est absolument normale.

Théories nerveuses. — Il suffit, pour les ruiner, de rappeler que les nerfs survivent aux muscles ; mais l'objection ne saurait prévaloir, si on fait intervenir les centres nerveux et, de ce côté, Goldscheider et Flateau (1897) ont signalé des lésions vacuolaires dans l'axe gris de la moelle des chiens morts surchauffés. Or, ces expérimentateurs sont les premiers à considérer ces lésions comme secondaires, et ils renoncent à leur attribuer les effets mortels de la chaleur.

Théories de l'intoxication. — Elles s'appuient sur la toxicité nouvelle et spéciale du sang et des tissus des animaux surchauffés, toxicité démontrée par Vincent (1887), à l'aide des méthodes classiques. Il ne faudrait pas méconnaître l'importance de ces données nouvelles, mais la théorie de l'intoxication ne serait admissible que s'il était démontré que la quantité de toxines nouvelles, fabriquées en surcroît par un surchauffé, suffisent précisément à le tuer.

En attendant, nous restons fidèle à la théorie de Cl. Bernard, pour ce double motif qu'elle rend compte des faits de la manière la plus satisfaisante, et que les autres théories ne résistent pas à la critique la plus sommaire.

CHAPITRE IX

INFLUENCE DU SYSTÈME NERVEUX SUR LA CALORIFICATION

Cette influence s'est manifestée avec évidence dans les faits précédemment exposés sur la fonction régulatrice. Mais tout est loin d'être clair dans cette question, et il est nécessaire de lui consacrer un paragraphe spécial pour dégager les choses acquises avec certitude et laisser entrevoir les solutions probables réservées par l'avenir aux points encore incertains et obscurs.

Le fait même de la régulation de la température implique l'intervention du système nerveux dans la calorification. Les actes par lesquels la production ou la dépense de la chaleur trouvent leur exacte mesure et s'adaptent aux exigences physiques de l'organisme s'exécutent avec cette précision et cette sûreté des mécanismes automatiques qu'on ne trouve que dans les fonctions nerveuses. Pour tout dire en un mot, le système nerveux pèse de très près sur la production et la déperdition de la chaleur, et il intervient en permanence pour ajuster l'un à l'autre ces deux termes de la calorification et en assurer la constante égalité. Il agit évidemment par voie réflexe, et toutes ses interventions sont déterminées pour les impressions thermiques dues au froid ou à la chaleur qui menacent de compromettre la fixité de la température centrale. Elles mettent donc en œuvre l'activité des centres nerveux et des nerfs, agents périphériques de transmission. La transmission des impressions thermiques sensitives ne comporte pas un examen particulier. Mais le mode d'action des nerfs centrifuges n'est pas complètement déterminé. Voyons d'abord ce que nous savons bien. Parmi ces derniers organes, nous ne connaissons positivement que les nerfs moteurs, les nerfs sécrétoires et les nerfs vaso-moteurs. Ils forment deux groupes et agissent les uns sur la production, les autres sur la répartition et la dispersion de la chaleur. Quant aux premiers (nerfs moteurs et nerfs sécrétoires), il leur suffit d'agir sur leur territoire fonctionnel pour modifier la production de la chaleur. Par cela seul qu'ils éveillent l'activité de leurs organes subordonnés, ils déterminent toutes les transformations de l'énergie qui aboutissent à l'excrétion de la chaleur. Ils produisent donc nécessairement des actions chimiques et des actions thermiques à l'occasion de leurs interventions fonctionnelles. Mais ces actions sont tout à fait indirectes; les nerfs moteurs sollicitent des combustions nouvelles et font naître de la chaleur dès qu'ils mettent les muscles en contraction; mais ces combustions et cette chaleur nouvelles dépendent de la contraction, et le nerf n'agit sur le chimisme vital et la thermogenèse qu'à travers le muscle, par l'intermédiaire du muscle et de son travail physiologique. Ces considérations s'appliqueraient exactement aux nerfs sécrétoires. Donc, et dans ces cas particuliers, quand on parle de nerfs thermiques, on veut simplement parler d'une action thermogène indirecte réalisée au moyen des organes placés sous la dépendance fonctionnelle du nerf et liée à leur travail propre par le cycle des transformations de

l'énergie attachées précisément à ce travail. Il n'y a donc ici rien de nouveau et de spécial. Ce qui appartient en propre au système nerveux dans les effets thermiques du travail, c'est la mesure, et c'est par là qu'il peut graduer la production de la chaleur. Son influence thermique réside dans l'intensité graduée de ses excitations fonctionnelles. Les organes qui en dépendent, muscles et glandes, font plus ou moins de chaleur, selon qu'ils travaillent plus ou moins, et c'est ce travail qui est réglé par le système nerveux. Sous la réserve de ces remarques, on peut appliquer aux nerfs moteurs et aux nerfs glandulaires la qualification de nerfs thermiques ou de nerfs calorifiques quand on la trouve avantageuse. Il en est de même pour les nerfs dits frigorifiques. Relativement à la fonction régulatrice, le froid ne consiste pas seulement dans une production moindre, mais dans une soustraction effective de chaleur. Nous avons vu comment cette soustraction est réalisée par les nerfs vasomoteurs de la peau, par les nerfs des glandes sudoripares et, enfin, par l'innervation respiratoire. L'intervention des nerfs donne toujours lieu ici à une production de froid, et on peut, si on veut, y voir des nerfs frigorifiques, à la condition de ne donner à cette expression qu'un sens relatif aux actes intermédiaires commandés par les nerfs. Tout cela se réduit à une question de langage et, à cet égard, nous ne nous éloignons pas très sensiblement des vues émises par M. Morat. Quant aux nerfs vaso-moteurs de la peau, ils donnent sa mesure au rayonnement cutané et, par là, ils interviennent de la manière la plus puissante et la plus efficace dans la répartition et la déperdition de la chaleur. Mais, considérée à ce point de vue, leur intervention est purement mécanique et nous en avons déjà exposé les effets d'une manière assez complète pour n'avoir pas à y revenir.

Jusqu'ici, l'influence thermique du système nerveux se manifeste clairement et par un mécanisme facile à saisir. Mais la question n'est pas épuisée et le problème se pose de savoir si le système nerveux peut solliciter des actions chimiques thermogènes, sans éveiller l'activité propre des tissus vivants ; en un mot, si, en dehors des nerfs fonctionnels comme les nerfs moteurs ou les nerfs glandulaires, il y a des nerfs proprement thermiques.

Il est bien entendu que, par cette nouvelle expression, on n'a jamais voulu entendre des nerfs agissant directement sur la matière chimique des réactions thermogènes. Ces organes agiraient toujours par l'intermédiaire des tissus vivants tout comme les nerfs moteurs ou sécrétoires, mais, au lieu de solliciter le travail physiologique des tissus, ils n'éveilleraient en eux qu'une activité indéterminée, tout à fait inconnue et mystérieuse, qui n'est ni le mouvement, ni la sécrétion, ni aucun autre mode de l'action fonctionnelle, mais une activité sourde, *sui generis* et sans autre effet sensible que des actions chimiques et un dégagement de chaleur. On voit ainsi que, dans cette hypothèse, la production de la chaleur cesserait de réclamer l'intervention du travail physiologique que nous avons pris l'habitude de considérer comme un terme nécessaire et inévitable du cycle des transformations de l'énergie aboutissant à la production de la chaleur. Il y aurait, dans le cycle, un terme nouveau et distinct. L'hypothèse n'est pas inconcevable et elle a des prises sur la réalité. La respiration élémentaire des tissus vivants, comme les

muscles frais séparés du corps, est la preuve indiscutable que les tissus peuvent effectuer des combustions et dégager de la chaleur sans produire leur travail spécial, manifestation ordinaire de leurs propriétés physiologiques et de leur irritabilité propre. Il est impossible de soutenir qu'un muscle frais, placé sous une cloche et fournissant les produits de ses combustions respiratoires, est en état de contraction, ou qu'un fragment de tissu cérébral placé dans les mêmes conditions est le siège de phénomènes de conscience. Les tissus peuvent donc respirer sans agir et il leur suffit de vivre pour brûler les aliments qui les imprègnent et produire de la chaleur. Mais, si dans cet ordre de faits, le travail proprement dit fait défaut, on y voit toujours la nécessité d'un intermédiaire physiologique, et si les tissus n'agissent pas au sens accoutumé, ils font bien quelque chose, et, pour n'avoir pas la physionomie ordinaire, leur travail invisible n'a pas moins de réalité. C'est sans doute ce travail commun dont parle M. Chauveau (*La vie et l'énergie*) et dans lequel s'effectue la rénovation de la matière vivante. Il faudrait voir, dans cette désorganisation incessante du protoplasma avec le mouvement de restauration qui l'accompagne, en même temps que l'effet d'une fragilité primordiale de la molécule vivante, le résultat d'un effort incessant, d'un véritable travail réclamant, comme tous les modes de l'activité, une dépense d'énergie chimique et aboutissant à une production de chaleur. On conçoit que le système nerveux ait une prise sur cette forme du travail, et que, dans cette direction, il puisse atteindre les sources de la chaleur animale. On conçoit, en un mot, qu'il y ait des nerfs proprement thermiques, c'est-à-dire capables d'influencer la thermogenèse autrement que par les interventions fonctionnelles précises emportant le travail physiologique des tissus. Claude Bernard n'en doutait pas, mais les faits qu'il invoque à l'appui de l'hypothèse des nerfs thermiques ne semblent pas démonstratifs. Ces faits sont ceux dans lesquels se manifestent les actions vaso-motrices du grand sympathique et qu'on met en évidence en agissant sur le cordon cervical. Voici ceux qui ont frappé Cl. Bernard. La section du cordon cervical du grand sympathique entraîne, avec la paralysie des vaso-constricteurs, la dilatation de tous les vaisseaux de la tête et du cou et, par corrélation, l'accroissement de la température dans les mêmes régions. L'hyperthermie s'accuse nettement si on place comparativement deux thermomètres dans l'oreille du côté sain et dans celle du côté de la section. Tout en attribuant partiellement cette hyperthermie à l'effet mécanique de la nouvelle répartition du sang, Cl. Bernard admet, en même temps, une production autochtone de chaleur dépendant de l'accroissement des actions chimiques locales. De même, quand on détermine l'action vaso-constrictive, en excitant le bout céphalique du cordon cervical, le refroidissement local qu'on obtient ne résulterait pas seulement de l'anémie provoquée par l'excitation, mais encore du ralentissement apporté dans les actions chimiques de la région et dans la production de la chaleur. Aux filets vaso-moteurs seraient donc associés des nerfs thermiques agissant tour à tour pour exalter ou pour diminuer la production locale de la chaleur. Dans le premier cas, ils seraient calorifiques, et frigorifiques dans le second. Nous avons déjà dit pourquoi ce dernier mot

est impropre, quand on le prend au sens littéral, et il est inutile de s'arrêter plus longtemps à une querelle de mots. Cl. Bernard fait reposer son interprétation sur les constatations suivantes : 1° L'hyperthermie consécutive à la section du cordon cervical survit à l'hypervascularisation. Mais, d'une part, cette hyperthermie ne conserve pas son intensité première et, d'autre part, pour se restreindre considérablement dans les jours qui suivent la section, la dilatation vasculaire ne disparaît pas complètement. En y regardant de très près, on verrait, sans doute, que les phénomènes vasculaires et les phénomènes thermiques sont exactement parallèles. 2° Après la ligature des veines auriculaires chez le lapin, il est encore possible d'obtenir de l'hyperthermie par la section du cordon cervical du grand sympathique. Mais est-on bien sûr d'oblitérer complètement la circulation de retour par la ligature des gros vaisseaux veineux superficiels de l'oreille? Le contraire est infiniment plus probable. 3° Quand on excite un muscle frais et détaché du corps, on obtient un dégagement de chaleur. C'est inévitable, et on serait surpris qu'il en fût autrement. L'expérience n'est démonstrative que si, à l'exemple de d'Arsonval, on conduit l'excitation nerveuse de manière à provoquer un dégagement de chaleur sans déterminer la contraction musculaire. Nous devons maintenant aborder une catégorie de faits où l'influence du système nerveux sur la calorification se manifeste d'une manière toute nouvelle. Ces faits sont relatifs aux conséquences résultant des traumatismes affectant les centres nerveux. Les uns sont suivis d'hyperthermie avec exagération dans la production de la chaleur, les autres d'hypothermie avec diminution dans la thermogenèse.

Traumatismes des centres nerveux produisant l'hyperthermie. — Les traumatismes de ce groupe ont été d'abord apportés par la clinique, et la première observation de ce genre est due à Brodie (1837). Il s'agissait d'un malade affecté d'une plaie contuse atteignant la moelle cervicale et accompagnée d'une paralysie de tous les muscles du tronc et des membres, sauf le diaphragme qui assurait la respiration. Chez ce malade, la température s'éleva progressivement, et un peu avant la mort, quarante-deux heures après l'accident, elle atteignait 43°,9. Billroth, Simon, Frerichs, ce dernier surtout, ont apporté des observations analogues. Les lésions expérimentales de la moelle cervicale peuvent produire les mêmes résultats. Déjà Nasse (1839), et Brown-Séquard (1859), avaient fait des expériences démonstratives, mais on doit à Naunyn et Quinke des recherches très précises sur ce point. Ces expérimentateurs opéraient sur le chien, par attrition de la moelle, au niveau de la sixième vertèbre cervicale. Après l'opération, tous les muscles du tronc et des membres, sauf le diaphragme, sont en pleine résolution et l'animal est atteint de paralysie générale. Pour éviter les effets dus aux troubles vasomoteurs de la peau, les expérimentateurs protégeaient l'animal contre cette cause de refroidissement, en l'entourant d'une enveloppe ouatée ou en le plaçant dans une étuve à 25°. Dans presque tous les cas, on a observé une élévation de la température centrale de 2 ou 3 degrés, atteignant son maximum quinze ou vingt heures après l'opération et peu d'instants avant la mort. Dans quelques expériences, le traumatisme médullaire a été suivi d'abord d'un abaissement de la température prolongé, pendant trois ou quatre heures, mais au bout

de ce temps la température se relevait progressivement pour atteindre un maximum exceptionnel, comme dans les faits du premier groupe. Ces expériences, répétées par Riegel, Rosenthal, Pochoy, ont donné des résultats contradictoires et ont produit le refroidissement des animaux; mais nous reviendrons plus tard sur ce point.

Constatons, pour le moment, que la clinique a révélé et qu'on peut réaliser, sur les centres nerveux, une catégorie de traumatismes accompagnés de ces deux effets contradictoires en apparence : la paralysie générale et l'hyperthermie. Ce sont des lésions à la fois destructives et irritatives. Mais il en est d'autres qui se bornent à ce dernier effet et qui entraînent une hyperthermie considérable. Le plus précis des faits de ce groupe est dû à Richet qui, en 1883, a montré que la piqûre de l'encéphale sur le lapin, à l'aide d'une aiguille traversant le cerveau et pénétrant jusqu'aux corps striés, est suivie d'une hyperthermie rapide pouvant atteindre 2 degrés en moins d'une heure. Les effets de la piqûre cérébrale ont été retrouvés ultérieurement par Aronsohn et Sachs, puis par Girard, et on peut dire qu'ils sont à peu près constants. Nous les avons observés nous-même plusieurs fois. Rien n'est changé dans l'habitude extérieure de l'animal, si ce n'est qu'il manifeste, parfois, les signes d'une excitabilité plus grande que de coutume. La piqûre cérébrale n'entraîne pas seulement l'hyperthermie, elle provoque aussi l'exagération de la thermogenèse, comme l'a vu Richet par des mesures calorimétriques directes, et l'accroissement des combustions respiratoires, comme l'ont établi Aronsohn et Sachs.

Il ne faudrait pas en inférer que le point de l'encéphale touché et provoqué par l'aiguille est un centre spécialement préposé à la calorification, car on obtient des effets du même ordre par des traumatismes de forme et de siège très variés. C'est ainsi que Richet provoque l'hyperthermie par la cautérisation de l'écorce cérébrale à l'aide du phénol cristallisé. D'autre part, Tscheschichin obtient des effets analogues en pratiquant la section de l'isthme encéphalique au niveau de la protubérance; on réussit mieux encore si, à l'exemple de Bruck et Gunther, on se borne à enfoncer une aiguille entre le pont de Varole et la moelle allongée; l'hyperthermie, dans ce cas, coïncide même avec la dilatation des vaisseaux cutanés, qui augmente la déperdition, et on a ainsi la preuve que l'excitation des centres nerveux a provoqué réellement un accroissement de la thermogenèse.

Traumatismes des centres nerveux produisant l'hypothermie. — Étudions maintenant les traumatismes nerveux suivis d'abaissement de la température centrale. Les faits les plus anciens sont dus à Chossat et à Brodie. Celui-ci enlève l'encéphale à un chien et lui permet de survivre quelques heures à l'aide de la respiration artificielle. La température centrale de l'animal s'abaisse rapidement jusqu'à la mort. Nous avons déjà fait connaître les conclusions vitalistes que l'auteur avait cru pouvoir tirer de ses expériences.

L'ablation de l'encéphale est une mutilation tellement grave et les troubles qu'elle apporte sont si divers et si étendus, qu'il est difficile d'en inférer une conclusion légitime sur l'influence thermique du système nerveux.

Les traumatismes portant sur la moelle ont des effets plus simples et, partant, plus démonstratifs. Or, Cl. Bernard a montré que la section de la moelle, pratiquée sur le chien ou le lapin, à la limite de la région dorsale et de la région cervicale, entraîne, avec la paralysie générale du sujet, un abaissement rapide et profond de la température centrale, au point que les animaux ainsi refroidis ont toutes les apparences d'un animal à sang froid. Dans une des expériences de Cl. Bernard, la température d'un lapin, opéré comme il vient d'être dit, est tombée en cinq heures de 40° à 24°. Pochoy, Riegel et Rosenthal ont obtenu des résultats du même ordre, et parmi les expériences du premier de ces expérimentateurs, il faut en retenir une tout à fait remarquable par l'intensité de ses effets. Sur un animal opéré à la façon de Cl. Bernard, la température centrale était à 19° huit heures après la section de la moelle et à 16° vingt-quatre heures après et peu d'instants avant la mort de l'animal. C'est une des températures les plus basses qui aient été observées sur un mammifère vivant.

Il est aisé de prévoir que l'hypothermie grave consécutive à la section de la moelle est associée à l'abaissement de la thermogenèse et qu'elle en est le résultat. Hanriot et Richet ont vérifié cette prévision par la mesure des échanges respiratoires, sur un chien dont la moelle avait été sectionnée entre la cinquième et la sixième vertèbre cervicale. L'intensité des combustions est tombée, en moins de deux heures, au cinquième de sa valeur initiale, et, pendant le même temps, l'animal subissait un refroidissement de 38° à 31°,5. Il apparaît donc bien que l'hypothermie des animaux paralysés par la section de la moelle est l'effet de la diminution des combustions respiratoires et de la thermogenèse. Vulpian avait été frappé, comme tous les expérimentateurs, de la dilatation des vaisseaux cutanés qui suit la section de la moelle et qui est l'effet de la paralysie vaso-motrice. Il en avait inféré que le refroidissement des animaux est dû à la déperdition exceptionnelle de chaleur résultant de la congestion de la peau. Cette explication est insuffisante, et la remarque de Vulpian prouve simplement que l'hypothermie procède de deux causes : l'accroissement dans la déperdition et la diminution dans la production de la chaleur. Aussi bien, Langlois a montré l'association de ces deux facteurs, à l'aide de déterminations calorimétriques directes. Il a constaté que le rayonnement calorifique des animaux augmente notablement après la section de la moelle cervicale ; mais si on défalque la part de ce rayonnement mesuré à la chaleur perdue par l'animal, et tiré de sa température finale, la différence donne la production réelle de la chaleur. Or, dans la plupart des cas, cette production est inférieure à la production normale.

Avant d'essayer l'interprétation des faits qui viennent d'être exposés, il convient de les grouper d'après la nature et les effets des traumatismes du système nerveux. En résumé, ces traumatismes donnent lieu à trois ordres de lésions.

1° Lésions purement irritatives : Piqûre cérébrale (Richet), piqûre du pont de Varole (Bruck et Gunther). — Ces lésions ne sont pas accompagnées de paralysie et elles déterminent l'accroissement de la thermogenèse et l'élévation de la température.

2° Lésions irritatives et destructives : Écrasement accidentel ou expérimental de la moelle cervicale (Brodie, Naunyn et Quinke), section de l'isthme au niveau de la protubérance annulaire (Tscheschichin). — Ces lésions entraînent la paralysie générale de tous les muscles situés au-dessous de la lésion. Or, en dépit de cette résolution musculaire complète, la température centrale s'élève et la production de la chaleur est augmentée.

3° Lésions purement destructives : Section de la moelle cervicale (Cl. Bernard, Pochoy, Riegel, Rosenthal), section du bulbe avec respiration artificielle (Tscheschichin). — Outre la paralysie générale des muscles, ces lésions entraînent l'abaissement progressif de la température et de la thermogenèse (Hanriot et Richet, Langlois).

On remarquera l'opposition qui existe entre les deux derniers groupes de faits. Les traumatismes de la moelle ont cet effet commun et nécessaire d'entraîner la résolution musculaire, mais, tandis que les uns provoquent l'augmentation de la température et de la thermogenèse, les autres en déterminent la diminution. Ces différences sont difficiles à interpréter, mais elles ont déjà le grand avantage de mettre en évidence, dans le névraxe, la dissociation de fonctions distinctes : la fonction motrice, abolie dans tous les cas, et la fonction thermique qui survit dans quelques-uns et y trouve une cause d'exaltation. Cette dissociation a ici la plus grande importance ; elle prouve qu'il faut se déshabituer de penser que les muscles sont les agents exclusifs de la thermogenèse et que le système nerveux est assujetti à se servir de leur intermédiaire pour agir sur la calorification. A ne considérer que les faits du troisième groupe, l'hypothermie et l'abaissement des combustions trouvent une explication simple dans l'abolition de l'activité musculaire, mais l'explication devient absolument insuffisante en présence des faits du second groupe, où l'inertie complète des muscles est accompagnée d'une exagération dans la thermogenèse et d'une élévation de la température. Il est évident que, dans ce cas, le système nerveux se sert d'un intermédiaire autre que les muscles. Au moins, il agit sur eux autrement que par des excitations motrices, puisque sa puissance motrice est abolie, et il ne reste plus, pour expliquer son influence thermogène, que la ressource de lui attribuer cette fonction thermique propre dont nous avons essayé de donner une idée plus haut. Dans cette hypothèse, tous les tissus qui ne cessent de demeurer les agents immédiats des réactions chimiques thermogènes lui sont étroitement asservis et restent les instruments périphériques de sa fonction thermique. Cette interprétation embrasse également tous les faits se rattachant aux diverses formes de traumatismes nerveux qui ont été envisagés dans le paragraphe précédent, et ceux du premier groupe (piqûres de l'encéphale) s'expliquent, comme les autres, de la manière la plus simple. Évidemment, dans l'exercice normal de la régulation de la température, les muscles n'abdiquent pas et, dès qu'ils restent placés sous l'influence motrice du système nerveux, ils contribuent de la manière la plus large à produire de la chaleur, dans la mesure même et en fonction de cette activité permanente qui les anime et qu'on désigne sous le nom de *tonus*. Mais la théorie du *tonus* ne semble pas répondre à tous les cas, et notamment à ceux où l'exercice de la fonction régulatrice emporte la

production de quantités exceptionnelles de chaleur sans entraîner pourtant une modification visible dans l'état physiologique des muscles. Il est difficile d'admettre, par exemple, que lorsque, chez un homme plongé dans un bain à 4°, l'intensité de la thermogenèse et des combustions devient 8 ou 10 fois plus considérable, la tonicité s'exagère dans la même proportion. S'il en était ainsi, le tonus aboutirait à un état de contracture véritable qui appellerait l'attention. Remarquons enfin que les animaux refroidis, et chez lesquels le réchauffement spontané réclame des combustions exceptionnelles, ne présentent aucun changement visible dans l'état de leur appareil musculaire : non seulement ils restent complètement immobiles, mais le frisson thermique fait souvent défaut chez eux.

La théorie du tonus paraît donc insuffisante. Déjà fort compromise par les considérations qui précèdent, elle résiste malaisément aux expériences récentes que M. Raphaël Dubois a exécutées sur la marmotte et qu'il est nécessaire de résumer ici, en exposant les faits essentiels qui s'en dégagent. Ces faits tendent à prouver que la tonicité musculaire est étrangère au réchauffement des marmottes, lorsqu'elles sortent de leur torpeur hibernale, et que le foie est l'agent de ce réchauffement. Sur le premier point, la démonstration semble péremptoire. Les effets de la section de la moelle revêtent chez la marmotte endormie et froide une expression particulière. Ils sont réciproques de ceux qu'on observe chez les mammifères ordinaires qui se refroidissent ou ne se refroidissent pas, selon le siège de la section.

a. Les sections de la moelle pratiquées dans la région dorsale n'empêchent pas le réchauffement ; elles se bornent à le ralentir quand elles portent sur l'intervalle compris entre la quatrième et la cinquième dorsale. On voit ainsi que la seule paralysie des muscles ne suffit pas à suspendre l'exercice de la fonction thermique du système nerveux, et que cette fonction se dissocie encore ici très nettement des fonctions motrices. Nous allons assister plus bas à une disjonction encore plus nette. Lorsque la section de la moelle, sur une marmotte engourdie et froide, porte au niveau de la quatrième vertèbre cervicale (les racines des nerfs phréniques sont conservées), l'animal reste figé dans sa torpeur et conserve sa basse température jusqu'à la mort qui survient au bout de six à huit jours. On obtient les mêmes résultats par la section du bulbe au-dessous du nœud vital. Jusqu'ici, nous sommes en présence de faits analogues aux faits classiques avec la nouvelle expression que leur confère l'état primitif de l'animal au moment de l'expérience. Mais M. Dubois en ajoute de nouveaux et de décisifs : lorsque la section de la moelle, qui d'ordinaire empêche le réchauffement, est opérée de manière à laisser subsister la continuité de l'axe gris, l'animal se réchauffe tout de même, en dépit de la résolution musculaire. Il en résulte que la fonction thermique du système nerveux peut s'exercer par des voies distinctes des voies motrices et sans mettre en œuvre, d'une manière expresse, le travail physiologique des muscles. Mais cette expérience n'exclut pas l'intervention de la tonicité musculaire qui survit aux sections partielles ou complètes du névraxe. Pour conclure sans réserve sur ce point, il faudrait une démonstration plus directe. Cette démonstration paraît résider dans les expériences et les observations

suivantes de M. Dubois : 1° chez les marmottes en hibernation profonde et très froides, la tonicité musculaire est conservée très énergique. Les animaux endormis sont roulés en boule et on a la plus grande peine à les étendre. La tonicité musculaire n'empêche donc pas le refroidissement des hibernants, et la diminution du chimisme respiratoire qui caractérise le sommeil de ces animaux ne procède pas de la diminution dans l'intensité d'un phénomène qui reste invariable ; 2° après la section de la moelle cervicale chez le lapin, la tonicité musculaire est conservée au point de s'exprimer parfois dans des contractures, ce qui n'empêche pas l'animal de se refroidir ; 3° la marche du refroidissement est la même chez un lapin à moelle sectionnée et à moelle détruite dans toute la portion située au-dessous de la section. La tonicité, présente dans le premier cas, absente dans le second, est donc sans influence sur la marche du refroidissement.

Pour tous ces motifs, il est permis de penser que le système nerveux ne règle pas la production de la chaleur en graduant le tonus musculaire. Comment donc agirait-il? et serait-il vrai qu'il trouve en dehors des muscles un organe intermédiaire qui serait l'instrument propre de son action thermogène? M. Raphaël Dubois voit cet instrument dans le foie, tout en établissant que l'action du système nerveux ne s'exerce pas directement sur cet organe, mais bien sur l'état de sa circulation. Par l'extirpation des ganglions cervicaux inférieurs, la section d'un certain nombre de cordons nerveux du grand sympathique, tels que la chaîne thoracique (à droite, entre le sixième et le septième ganglion), le nerf splanchnique droit, on ralentit plus ou moins le réchauffement d'une marmotte endormie. Mais pour obtenir un résultat décisif, il faut procéder à l'extirpation des ganglions du plexus solaire. Dans ce cas, le réchauffement de l'animal serait complètement empêché. Cet effet n'est pas dû à une action directe, car on n'empêche pas le réchauffement d'une marmotte engourdie en pratiquant la névrotomie totale des nerfs du foie. D'autre part, on obtient des effets identiques à ceux de l'extirpation des ganglions solaires par la seule ligature de la veine porte ou celle de la veine cave inférieure au-dessus du foie. Il paraît ainsi démontré que le système nerveux n'atteint la calorification que par l'intermédiaire de la circulation porte. Il entretient ce vaisseau dans un état de pression convenable pour assurer l'irrigation sanguine du foie et maintenir dans cet organe les conditions physiques de la production et de la distribution du glycose. En fait et d'une part, le glycogène s'accumule dans le foie pendant l'hibernation, tandis que le sang ne contient que des traces de glycose, fait déjà constaté par Cl. Bernard. D'autre part, chez les hibernants, le sang ne contient pas autant d'eau que pendant la veille (0,780 environ pendant le sommeil et 840 chez l'animal éveillé). En revanche, l'estomac, le cæcum, le péritoine des sujets endormis contient des réserves abondantes de liquide qui sont reprises par la circulation dès le réveil. Ces faits mettent en relief un des modes de l'intervention du système nerveux dans la calorification. Il règle la circulation de la veine porte et rapproche les conditions physiques de la glycogénie. Cette conclusion n'est pas discutable, mais il serait excessif de dire que le mécanisme de la régulation réside entièrement dans l'action vaso-

motrice du système nerveux sur la veine porte. Il faudrait, pour être autorisé à conclure dans ce sens, démontrer que l'extirpation des ganglions solaires chez un animal quelconque est suivie du refroidissement de l'animal et de la disparition du sucre dans le sang.

L'ensemble des faits exposés dans ce paragraphe nous paraît justifier les conclusions suivantes : la régulation de la température est une fonction du système nerveux. Celui-ci règle la production et la déperdition de la chaleur. Il règle la déperdition, par des actions vaso-motrices qui changent la répartition du sang, par des actions sécrétoires, comme la sécrétion de la sueur, et par des actions respiratoires qui graduent l'évaporation de l'eau. Il règle la production de la chaleur : 1° par son influence purement fonctionnelle et en graduant les excitations par lesquelles il éveille l'activité des tissus et sollicite leur travail physiologique. A cet égard, le tissu musculaire conserve sa prépondérance sur les autres tissus et reste l'agent principal de la calorification ; 2° par des actions vaso-motrices qui règlent la circulation de la veine porte et introduisent les conditions mécaniques et physiques de la glycogénie hépatique. Il préside ainsi à l'élaboration et la distribution des matériaux de la combustion respiratoire ; 3° enfin, par une influence tout à fait spéciale en vertu de laquelle il éveille dans les tissus des actions chimiques et thermiques qui ne dépendent pas de leur activité propre, et des manifestations ordinaires de leurs propriétés physiologiques, mais bien d'un travail indéterminé dans sa nature, mais précis dans son but qui est de contribuer à la production de la chaleur. Dans cet ordre de faits, le système nerveux intervient directement dans la thermogenèse et exerce une véritable fonction thermique distincte de toutes ses autres attributions.

Toutes les actions qui viennent d'être envisagées sont régies par l'influence directrice des centres nerveux, mais il est impossible de localiser dans le névraxe des foyers particuliers de substance grise, exclusivement préposés à la calorification. En un mot, il n'y a pas de centres thermiques distincts.

CHAPITRE X

TROUBLES DE LA RÉGULATION

On peut embrasser sous ce titre les états morbides comprenant dans leurs manifestations, soit un abaissement, l'hypothermie, soit une élévation de la température centrale, l'hyperthermie. Chacun de ces faits obéit à des lois différentes, selon qu'il procède d'une cause externe ou d'une cause interne, et il faut les étudier à ce double point de vue.

Hypothermie de cause externe. — Elle est due exclusivement à l'influence du froid extérieur, sous toutes ses formes, et se produit toutes les fois que l'intensité du froid excède les limites et les ressources du pouvoir de régulation. Nous l'avons examinée plus haut et nous en avons fixé le déterminisme.

On en a recueilli, chez l'homme, un certain nombre de cas dans lesquels la température centrale est tombée au-dessous de 32°. Le plus intéressant a été

observé par Diday qui a constaté une température de 26°, sur un homme, à la suite d'un bain froid.

Hypothermie de cause interne. — Contrairement à ce qui a lieu dans les faits qui précèdent, l'abaissement de la température centrale procède ici d'un abaissement primitif dans l'intensité des combustions, et cet abaissement a des origines très variables dont la considération permet de classer méthodiquement les faits.

A. Hypothermie due a l'influence de certaines maladies. — Nous signalerons notamment les affections cachectisantes, comme le cancer, qui produisent à la longue l'épuisement du malade et atteignent la calorification dans sa source même par l'amoindrissement de l'activité générale. Certaines affections du système nerveux, comme la méningite tuberculeuse et les divers modes de traumatisme paralytique étudiés dans le précédent chapitre, produisent aussi l'hypothermie.

B. Hypothermie due a l'insuffisance de la respiration et de l'alimentation. — Nous n'avons qu'à rappeler ici les effets de l'asphyxie, des hémorragies, de l'inanition. Ce sont ces effets qui interviennent dans l'hypothermie qu'on observe si fréquemment chez les enfants atteints d'athrepsie et de broncho-pneumonie ou de cyanose.

C. Hypothermie due aux intoxications. — Il convient de distinguer deux groupes d'intoxications, selon qu'elles procèdent des substances toxiques et médicamenteuses ou des toxines sécrétées, soit par les microbes pathogènes, soit par les cellules de l'organisme.

Effets thermiques des substances toxiques et médicamenteuses. — Ces effets se rattachent à peu près exclusivement à l'influence des alcaloïdes. M. Richet en a fait une étude très ingénieuse et très complète en les groupant d'après les localisations et l'action physiologique des substances toxiques. Nous ne pouvons pas suivre l'auteur dans tous les développements qu'il a consacrés à cette question, mais nous rappellerons les idées maîtresses dont il s'inspira très judicieusement. Les alcaloïdes qui agissent sur la calorification et la température sont des poisons du système nerveux. Leur influence s'exerce exclusivement sur les cellules centrales ou les cellules terminales. A cet égard, et en raison des préférences ou des affinités manifestées par les substances médicamenteuses, il y a lieu de distinguer les poisons cérébraux, les poisons bulbaires, les poisons médullaires et les poisons périphériques. La délimitation de ces différents groupes n'est vraie que pour les doses ordinaires bornées à l'action thérapeutique, ou suffisantes pour donner la mort. Mais si on augmente les doses en ayant soin de pratiquer la respiration artificielle pour reculer les limites de l'influence mortelle, les poisons du système nerveux peuvent passer d'une classe dans l'autre et déterminer des manifestations relevant du cerveau, du bulbe ou de la moelle. L'action des poisons nerveux traverse deux phases : une phase d'excitation et une phase de dépression pouvant aller jusqu'à la paralysie.

Les poisons *cérébraux* (anesthésiques, morphine, quinine) ne tardent pas à étendre leur action jusqu'à la moelle et à déterminer la résolution mus-

culaire. L'hypothermie consécutive résulte donc à la fois de la dépression du système nerveux atteint dans sa fonction thermique et de l'inertie des muscles.

Les poisons *bulbaires* (aconitine, vératrine, digitaline) atteignent directement la fonction thermique des centres nerveux. Parmi eux, la digitaline offre un caractère particulier. Employée méthodiquement et d'une manière continue, elle produit un empoisonnement chronique accompagné d'une chute profonde de la température centrale. En quelques jours, M. Mégevant (cité par Richet, *Chaleur animale*, p. 201), agissant sur lui-même, a fait tomber sa température de 37°,3 à 35°,8. De même, un chien soumis à l'action permanente de la digitaline s'est refroidi, en un mois, de 38°,9 à 36°,7.

Les poisons *médullaires*, comme la strychnine, n'entraînent l'hypothermie qu'à hautes doses et à la condition que, par l'emploi de la respiration artificielle, on leur permette de poursuivre leur action toxique jusqu'à la paralysie.

Sous l'influence des poisons périphériques, comme le curare, l'hypothermie est la conséquence naturelle de la paralysie générale et de l'inertie des muscles provoquées par ce groupe de substances toxiques.

Hypothermie due à des toxines d'origine cellulaire. — L'organisme sécrète des poisons hypothermisants qui sont éliminés par le rein au fur et à mesure de leur production. Ils manifestent leurs effets, soit au cours de l'urémie, soit à la suite des injections intraveineuses d'urine (Bouchard). L'hypothermie d'origine urémique est facilement obtenue par la ligature des uretères (Lépine). Les substances hypothermisantes peuvent se retrouver jusque dans le sang, puisque, selon Cadiot et Roger (1894), les injections intra veineuses de sang artériel emprunté à un chien ou à un lapin déterminent un refroidissement de quelques dixièmes de degré. Il résulte enfin des expériences de Leclainche et Rémond que le sérum du sang de certains animaux (bœuf, chèvre, mouton) injecté dans le péritoine du cochon d'Inde produit des effets mortels avec une hypothermie rapide et profonde, qui, au moment de la mort de l'animal d'épreuve, atteint 12° à 15°. Dans un cas, le cobaye injecté a succombé, après dix-sept heures, avec une température centrale de 23 degrés.

Hypothermie due à des toxines d'origine microbienne. — Loin de produire l'hypothermie, la plupart des virus déterminent une élévation de la température centrale ; mais on peut obtenir l'hypothermie d'emblée par l'injection sous-cutanée des cultures du bacille pyocyanique (Charrin). D'autre part, la période terminale de l'empoisonnement dû aux toxines diphtéritiques est précisément caractérisée par une hypothermie considérable. Nous retrouverons ces faits dans l'étude de la fièvre.

En résumé et pour conclure, si diverses qu'elles soient, les substances qui produisent l'hypothermie sont des poisons du système nerveux qui atteignent doublement le névraxe, et dans sa fonction thermique et dans sa fonction motrice.

De l'hyperthermie : hyperthermie de cause externe. — Cette dernière forme est due à l'excès de la température extérieure et nous l'avons dans déjà étudiée. Quand l'influence de la chaleur extérieure s'exerce

les limites physiologiques, elle entraîne la diminution des combustions. Au delà, elle provoque un mouvement fébrile accompagné d'hyperthermie, avec exagération des combustions respiratoires (Quinquaud, Rosenthal, Vincent). Dans l'ordre pathologique, elle provoque cet état morbide connu sous le nom de coup de chaleur ou insolation. Cet état est caractérisé par une céphalalgie intolérable, des vertiges, du délire, de la dyspnée, une grande faiblesse musculaire, des sueurs visqueuses et enfin par l'hyperthermie. Celle-ci atteint en moyenne 43°. La température la plus élevée a été observée par Zuber qui a constaté 44° sur un malade, et 45° quelques minutes après la mort. On est d'accord pour admettre que la chaleur extérieure n'est pas le seul facteur des accidents qui constituent l'insolation. L'activité musculaire serait un élément indispensable dans la pathogénie du coup de chaleur qui, en fait, ne s'observe que sur des hommes se livrant à un travail plus ou moins pénible, comme les soldats en marche, les terrassiers, les ouvriers agricoles, etc.

Hyperthermie de cause interne. — Elle se rattache à deux ordres de faits : les maladies et les intoxications.

Influences pathologiques. — L'hyperthermie s'observe dans certaines affections intéressant le système nerveux d'une manière plus ou moins directe. Telles sont : le délire alcoolique, l'hémorragie cérébrale, l'épilepsie, l'éclampsie, le tétanos et, d'une manière générale, les affections convulsivantes. Dans ces différents cas, la température peut s'élever très haut; on a observé des températures de 42° dans des accès de délire alcoolique, de 43°,1 dans l'éclampsie. On doit à Wunderlich de curieuses observations sur le tétanos. Cet éminent clinicien a signalé notamment deux cas particulièrement intéressants. Dans le premier, la température, qui était de 42°,8 pendant la vie, s'est élevée à 44°,6 après la mort. Dans le second, on a noté 44°,75 aux dernières phases de la maladie et 45°,37 peu de temps après la mort. Les traumatismes du système nerveux entrent dans ce groupe de faits. Ils ont été étudiés dans le chapitre précédent et nous n'avons pas à y revenir.

Hyperthermie due aux intoxications. — Nous adopterons ici la même classification que pour l'hypothermie et nous étudierons successivement l'effet des substances médicamenteuses et des toxines d'origine cellulaire ou microbienne.

Hyperthermie due à l'effet des substances toxiques et médicamenteuses. — Nous retrouvons, dans ce paragraphe, les poisons du système nerveux et nous continuons à les grouper de la même manière. Parmi les *poisons cérébraux*, il faut seulement retenir la cocaïne qui exalte l'irritabilité des centres moteurs corticaux et atteint la calorification par l'intermédiaire des muscles; on n'obtient plus, en effet, l'hyperthermie par la cocaïne si, au préalable, on a curarisé l'animal (Richet contre Mosso), ou bien encore, si on épuise l'irritabilité des centres corticaux par l'excitation électrique de ces centres. Dans le même ordre d'idées, la cocaïne n'est pas hyperthermisante chez les vertébrés inférieurs (reptiles, oiseaux), ni chez les mammifères nouveau-nés, où les centres moteurs de l'écorce ne sont pas spécialisés.

Les *poisons bulbaires* sont primitivement hypothermisants, mais avec l'un d'eux, la vératrine, qui, à faibles doses, agit comme l'aconitine, on peut obtenir des effets convulsivants : il suffit de l'administrer à fortes doses et de pratiquer la respiration artificielle. On obtient alors une hyperthermie très élevée qui, dans une expérience de Richet, a pu atteindre 45°,6.

Les *poisons médullaires* se groupent autour de la strychnine (igasurine, ditaïne, thébaïne, picrotoxine, caféine, cédrine, pelletiérine, spartéine, piridine, ammoniaque et ammoniaques composées, comme l'amylamine et la propylamine). Tous ces poisons agissent surtout par l'intermédiaire des muscles dont la puissance thermogène prévaut sur tous les autres facteurs.

Hyperthermie due à des toxines d'origine cellulaire. — Les poisons hyperthermisants sécrétés dans l'organisme se manifestent dans un certain nombre de faits où on obtient de la fièvre par l'injection intra veineuse du sang lui-même ou de l'extrait aqueux des tissus frais. Sur le premier point, Cadiot et Roger ont montré que le sang veineux du chien et du lapin donne la fièvre au lapin et élève sa température de plus de 1 degré. On obtient également de l'hyperthermie avec du bouillon pur et stérilisé (Charrin et Ruffer), de l'extrait aqueux de rate saine (Roux), de l'extrait aqueux du rein (Lépine). L'influence des toxines rénales a été démontrée par M. Lépine d'une manière très ingénieuse : l'éminent professeur réalise la macération du rein sur le vivant. A cet effet, les uretères d'un chien sont reliés à un réservoir placé à une hauteur suffisante pour neutraliser la poussée urinaire, et rempli d'une solution physiologique (sel marin à 7 p. 1000). Dans ces conditions, l'animal présente une respiration bruyante, irrégulière; l'hyperthermie se déclare et n'atteint pas moins de 40° à 42°,6 au moment de la mort.

Hyperthermie due à des toxines d'origine microbienne. — De la fièvre. — Lorsque l'intoxication qui produit l'hyperthermie est attachée à l'évolution d'une maladie infectieuse, elle constitue la fièvre, et nous sommes conduits à considérer brièvement cet état morbide. Cliniquement, la fièvre est un état pathologique caractérisé par l'élévation persistante de la température, la fréquence du pouls, l'accélération de la respiration et l'altération de la nutrition. Certains états entraînent de pareilles manifestations et peuvent simuler la fièvre : tels celui d'un coureur après un violent exercice ou celui d'un homme sortant d'un bain de vapeur; mais ici les signes de la fièvre sont fugitifs et ne survivent que très peu de temps à la cause qui a exaspéré les grandes fonctions de l'organisme. Dans la fièvre, au contraire, l'hyperthermie est permanente et reste subordonnée à l'évolution du procès morbide qu'elle accompagne. Elle atteint toutes les régions du corps et se manifeste notamment à la peau qui, en dehors des périodes de frisson, est parfois brûlante chez les fébricitants. En somme, la fièvre, caractérisée surtout par l'hyperthermie, est un symptôme des maladies infectieuses.

Une théorie générale de la fièvre doit répondre à ces deux questions : quelle est la cause de la fièvre et par quel mode agit cette cause? La pathogénie et la physiologie pathologique de la fièvre, tels sont les deux points de vue qui doivent être envisagés.

Pathogénie de la fièvre. — Sur ce fait, nous avons répondu à l'avance et nous répétons que la fièvre est due à l'infection. Elle se rattache à l'influence toxique des substances sécrétées par les microbes pathogènes. Nous sortirions des cadres de ce travail si nous prétendions exposer la série des faits qui ont fixé la doctrine sur ce point. Nous ne devons nous occuper ici que des troubles apportés par la fièvre dans la régulation de la température.

Physiologie pathologique de la fièvre. — Pour établir le mécanisme de l'hyperthermie chez les fébricitants, il est nécessaire de constater tout d'abord ce fait, que les dépenses chimiques de l'organisme sont augmentées dans la fièvre ; cet accroissement est dénoncé : 1° par l'exagération des combustions respiratoires (Liebermeister, 1864 ; Leyden, 1869 ; Regnard, 1873 ; Arloing et Laulanié, 1895 ; Kaufmann, 1896) ; 2° par l'exagération du rayonnement calorifique (Liebermeister, 1869 ; Langlois, Arloing et Laulanié, Kaufmann) ; 3° par l'accroissement de l'excrétion azotée (Leyden, Ulrich, Rosenstein, Fouilloux, Hirtz) ; 4° par la perte de poids des malades. D'après Liebermeister, la diminution quotidienne du poids est supérieure de 40 p. 100 à ce qu'elle serait à l'état normal, pendant l'inanition. Weber a trouvé chez les fébricitants une perte de 30 à 44 grammes par jour et par kilogramme, alors que les individus sains soumis à la diète ne perdent que 23 à 30 grammes ; 5° la dénutrition s'exprime enfin par la chute rapide et profonde du quotient respiratoire. Regnard a vu ce rapport tomber à 0,600 et 0,500. Dans nos recherches précitées avec Arloing, la diminution du quotient respiratoire chez les animaux rendus fébricitants par des injections sous-cutanées de toxines diphtéritiques n'a jamais fait défaut, mais nous n'avons pas observé des chiffres aussi bas que ceux de Regnard.

De l'ensemble de ces faits, on peut conclure que l'hyperthermie dans la fièvre est accompagnée d'un accroissement dans les dépenses chimiques de l'organisme et dans la production de la chaleur. Ce point de fait nous permet d'exclure d'emblée toutes les théories vaso-motrices de l'hyperthermie. Il faut pourtant dire un mot de ces théories. Traube (1863-1864) explique l'élévation de la température chez les fébricitants par la diminution du rayonnement calorifique ; d'où une rétention et une accumulation de la chaleur normale. Traube considère exclusivement le stade de frisson et il méconnaît cette double circonstance, que, d'une part, il n'y a pas de frisson dans toutes les fièvres, et que, d'autre part, lorsque le frisson se produit, la température du fébricitant atteint déjà un degré très élevé. Senator, reprenant en 1873 la théorie de Traube, ne l'a guère améliorée en supposant que la diminution du rayonnement est seulement périodique. Au contraire de Traube qui n'a vu que le frisson, Marey n'a considéré que la dilatation des vaisseaux cutanés, chez les fébricitants, et la chaleur des téguments. Il en conclut que l'hyperthermie résulte simplement d'une nouvelle répartition de la chaleur qui se répand uniformément dans tous les points. Il admet que l'élévation de la température consisterait bien plutôt en un nivellement de la chaleur, dans les différents points de l'économie, que dans un échauffement absolu. Mais cet échauffement absolu est précisément la caractéristique même de la fièvre. Le corps

d'un fébricitant contient plus de chaleur que le corps d'un homme de même poids à la température normale et on déterminerait aisément l'excès de cette chaleur fébrile.

Disproportion entre l'exagération des combustions et l'hyperthermie. — L'excès de la calorification et des combustions ne rend pas compte de l'élévation de la température centrale dans la fièvre. A l'état normal, l'organisme lutte victorieusement contre des causes intérieures d'échauffement autrement puissantes (travail musculaire). Il y a donc dans la fièvre un trouble essentiel de la régulation et, si on considère la permanence de l'hyperthermie, la fixité relative de la température fébrile, on aperçoit un nouvel élément qui est l'élévation du niveau de la régulation. Le fébricitant est un malade qui règle sa température à un degré plus élevé que le degré normal. De telle sorte que l'hyperthermie apparaît comme un résultat preparé à l'avance et en quelque sorte voulu. De là, l'idée que l'excès anormal de la température est peut-être un bien et que la fièvre porte en elle-même un moyen de défense. L'idée n'est pas nouvelle, et M. Bouchard n'est pas éloigné de l'accueillir. Elle a contre elle les effets nuisibles de l'hyperthermie qui inclinerait les tissus à la dégénérescence graisseuse. Mais il faudrait préciser ce point et savoir si les dégénérescences qu'on observe dans certaines infections procèdent de l'hyperthermie ou de toute autre cause.

Dès que les faits mettent en lumière l'intervention d'une action régulatrice dans la fièvre, et nous venons de l'établir, ils prouvent par là même l'intervention du système nerveux. Les substances pyrétogènes ne sauraient d'ailleurs exercer une action directe sur les tissus; c'est sur les centres nerveux qu'elles agissent et dont elles sollicitent la fonction thermique. Les toxines microbiennes sont, on le voit, des poisons du système nerveux.

Des rapports de la température et de la calorification dans la fièvre. — Dans ce qui précède, nous admettons implicitement que le degré de la température et l'intensité de la thermogenèse suivent la même marche. Les recherches de Liebermeister, puis de Langlois, plaident au moins dans ce sens. Mais on a produit un certain nombre de faits en opposition avec cette loi : c'est ainsi que dans l'infection provoquée par l'inoculation du bacille pyocyanique (Langlois et Charrin, 1892), ou par l'injection souscutanée des cultures de ce bacille (d'Arsonval et Charrin), on voit des températures fébriles coïncider avec un rayonnement cutané moins intense que celui de l'état normal. Il en serait de même avec la tuberculine. Il y aurait donc lieu d'admettre que la théorie de Traube n'est pas sans quelque fondement, ou qu'elle répond à certains faits particuliers. Mais il ne faudrait pas se hâter de conclure. Nous avons vu, nous aussi, dans nos recherches sur les toxines diphtéritiques, la chute du rayonnement et des combustions coïncider avec l'hyperthermie fébrile; mais si on observe de près, on voit que, pour être encore très élevée, la température suit pourtant une marche descendante. Il y a dans l'intoxication diphtérique une phase de dépression qui s'annonce par une brusque diminution des combustions et de la thermogenèse. Or cette phase surprend le malade en pleine hyperthermie et le refroidissement de celui-ci marche avec une certaine lenteur. On conçoit

donc que la chute des combustions puisse s'opérer assez rapidement pour ne pas entraîner un refroidissement immédiat. Dès lors, les brusques changements du chimisme respiratoire sont nécessairement plus rapides que les changements purement physiques de la masse du corps exposée au rayonnement. Il faut, pensons-nous, tenir compte de ces faits, quand on étudie la marche des éléments fébriles. Il faut compter avec les intoxications comportant une phase d'hypothermie finale et dans lesquelles la chute des combustions précède nécessairement celle de la température fébrile. Une enquête expérimentale s'impose, et, si nous ne pouvons affirmer à l'avance les résultats de cette enquête, nous ne serions pas surpris si elle établissait que, dans la fièvre, la marche de la température dépend de la marche des combustions.

Cette question nous conduit à la suivante :

De la température centrale et de l'intensité de la thermogenèse. — C'est une notion banale que le degré de la température centrale ne fournit aucune indication sur l'intensité des combustions et de la thermogenèse. Si cette température reste invariable, elle nous laisse ignorer les changements qui peuvent survenir dans la calorification, et, si elle subit des changements, on ne peut pas dire à l'avance si ces changements se produisent dans le même sens que ceux de la thermogenèse ou en sens inverse. Mais il est impossible de se contenter d'une pareille indétermination et il est bon de rechercher si les changements corrélatifs de la température et de la thermogenèse n'obéissent pas, quant à leur direction, à des lois précises. Nous allons essayer d'indiquer le sens de ces lois.

Les variations de la température centrale tendent à produire l'hyperthermie ou l'hypothermie. Or, ces deux faits sont liés, de manières différentes, à l'intensité de la thermogenèse, selon qu'ils se rattachent à une cause externe ou à une cause interne. Pour simplifier, nous embrassons dans le tableau suivant les différents cas qui peuvent se présenter :

I Hypothermie de cause externe.	Tant qu'elle n'est point parvenue au degré de la température critique, elle provoque invariablement l'exagération des combustions et de la thermogenèse (froid sous toutes ses formes, tonte, vernissage).
II Hypothermie de cause interne.	Elle résulte constamment d'un abaissement primitif des combustions et de la thermogenèse (asphyxie, hémorragies, inanition, affections cachectisantes, sommeil, résolution musculaire, agonie, etc.).
III Hyperthermie de cause externe.	(Chaleur extérieure, vêtements.) Quand elles s'exercent dans les limites physiologiques, ces influences provoquent un abaissement des combustions et de la thermogenèse.
IV Hyperthermie de cause interne.	Elle résulte constamment d'un accroissement primitif des combustions (alimentation, travail, traumatismes du névraxe, intoxication, fièvre [?], etc.).

En résumé, on voit que, sous l'influence des causes extérieures, la température et la thermogenèse subissent des variations de sens inverse, et que, sous l'influence des causes internes inhérentes à l'état ou aux besoins des tissus, ces deux termes varient dans le même sens.

Sous une autre forme, quand l'organisme est actif ou qu'il a l'initiative des changements, ces changements ont lieu dans le même sens pour la température et pour la thermogenèse. Quand l'initiative vient du dehors et que l'organisme lutte contre le froid ou contre le chaud extérieurs, les changements de la température centrale et de la thermogenèse ont lieu en sens inverse.

TRAVAIL FOURNI PAR LES ANIMAUX

RENDEMENT DES MOTEURS ANIMÉS

Par M. GARIEL

---

1. — Tous les animaux exécutent des mouvements, mouvements de totalité ou mouvements de certains organes. Le fait de faire passer une masse matérielle de l'état de repos à l'état de mouvement, ou seulement de faire varier la grandeur ou la direction de la vitesse, exige une certaine dépense d'énergie.

Ils peuvent également déplacer les corps extérieurs, au moins dans de certaines conditions, c'est-à-dire qu'ils peuvent les faire passer de l'état de repos à l'état de mouvement ; ils peuvent également faire varier la vitesse de ces corps, ce qui exige de même une certaine force d'énergie.

Ils peuvent modifier les conditions des corps extérieurs, changer la forme des solides, les réduire en fragments, comprimer des liquides, des gaz, etc., ces actions correspondent également à une dépense d'énergie.

Dans quelles conditions les animaux produisent-ils les effets que nous venons de signaler comme exemples, et quelle est l'origine de l'énergie qu'ils mettent en jeu? telle est la question que nous nous proposons d'étudier.

2. — Mais, tout d'abord, il est nécessaire de donner quelques indications générales sur l'énergie et sur certains éléments mécaniques que nous aurons à employer.

Considérons un point de masse m, animé d'une vitesse v, rencontrant un autre point en repos ou en mouvement ; par suite de cette rencontre, de ce choc, le second point sera modifié dans son état de mouvement ou de repos et l'on démontre en mécanique que la grandeur de la modification observée dépend du produit mv^2 qu'on désigne sous le nom de *force vive* du premier point. Il importe de remarquer que cette dénomination doit être prise en bloc comme représentant seulement la valeur du produit mv^2 et qu'il n'y a pas à chercher à l'analyser grammaticalement.

Si l'on a un système de points de masse $m, m', m'', \ldots$ animés respectivement des vitesses $v, v', v'', \ldots$ la somme $mv^2 + m'v'^2 + m''v''^2 + \ldots$, qu'on représente abréviativement par le symbole Σmv^2, est désignée sous le nom de *force vive du système*.

Quand un point ou un système de points en mouvement agit sur un corps en produisant sur celui-ci une action mécanique, on reconnaît que la force vive du point ou du système de points varie de grandeur : on peut regarder cette variation de la force vive comme la cause de l'effet produit.

Mais un point ou un corps peut agir sur un autre corps dans d'autres conditions; tel est, par exemple, le cas d'un aimant qui, à distance, attire ou repousse une aiguille aimantée : il n'y a dans ce cas aucune variation de la force vive de l'aimant. Pour expliquer, au point de vue mécanique, l'effet produit, on imagine que l'aiguille aimantée est soumise à un agent spécial qu'on a appelé une *force* : cet agent hypothétique, cette force est caractérisée, définie par l'effet qu'elle produit et l'on sait, sans que nous ayons à nous y arrêter, qu'on lui considère un point d'application, une direction et une intensité.

Dans un certain nombre de cas, on peut déterminer la cause réelle de l'effet produit : c'est ainsi que les actions mécaniques exercées par les corps dont on élève la température ont réellement pour cause la variation de quantité de chaleur possédée par le corps qui se dilate. Il est commode de n'avoir pas, au point de vue purement mécanique, à considérer des causes diverses qui produisent des effets de même nature; et dans tous les cas où il se produit une action mécanique qui n'est pas due à la variation de force vive d'un autre corps, on admet que cette action mécanique est due à une force.

Il importe de remarquer que, en réalité, on ne résout pas la question qui se pose effectivement : dans l'exemple précédent, il faudrait chercher quelle relation existe entre la variation de quantité de chaleur et l'effet mécanique. On laisse de côté l'action calorifique, quand on introduit l'idée de force; mais alors se présente un autre problème qui consiste à déterminer la relation existant entre la force et l'action calorifique. La force n'est donc qu'un intermédiaire qu'on introduit volontairement, mais qui a l'avantage de simplifier l'étude des actions mécaniques en considérant pour celles-ci une cause toujours de même nature.

Une force peut être appliquée en un point qui soit au repos, et dans ce cas son action est déterminée seulement par les éléments que nous avons rappelés plus haut : point d'application, direction, intensité. Mais il n'en est plus de même si la force est appliquée à un point en mouvement, et alors son action dépend, en outre des éléments précédents, du déplacement du point d'application, de sa grandeur et de sa direction par rapport à la direction de la force.

On reconnaît que l'action de la force dans le cas où le déplacement est rectiligne (et quel qu'il soit on peut toujours en considérer un assez petit pour qu'il puisse être regardé comme tel) dépend du produit de la force, par la projection du déplacement sur la direction de la force, ou, ce qui revient au même, au produit du déplacement par la projection de la force sur la direction du déplacement.

Ce produit est ce qu'on appelle le *travail de la force* pour le déplacement considéré.

Si la force varie de grandeur, si sa direction change par rapport au déplacement, il faut diviser le mouvement en éléments assez petits pour que dans

chacun d'eux la grandeur de la force et l'angle des deux directions puissent être regardés comme constants. On peut alors déterminer une série de travaux *élémentaires* dont la somme constitue le *travail total* pour le déplacement considéré.

Le travail d'une force peut être déterminé simplement dans certains cas particuliers. C'est ainsi que dans le cas de la pesanteur, cas que nous aurons souvent à considérer, le travail correspondant au déplacement d'un corps est égal au produit du poids du corps par la distance des plans horizontaux qui passent l'un par le point de départ du corps, l'autre par son point d'arrivée, quelle que soit la trajectoire parcourue.

Ajoutons encore que quand une force est appliquée à un point en mouvement (le mouvement étant dû à une cause quelconque) l'action de cette force peut être d'aider à ce mouvement ou de s'y opposer; il est nécessaire de distinguer le travail de la force dans ces deux cas : on y arrive en disant qu'il est positif dans le premier cas, négatif dans le second, et on attribue respectivement aux valeurs correspondantes les signes $+$ et $-$.

Le travail d'une force est une cause d'action mécanique, de même que nous l'avons indiqué pour la force vive.

3. — On désigne d'une manière générale sous le nom d'*énergie* toute cause d'action, ici, toute cause d'action mécanique. Nous dirons donc que le travail des forces et que la force vive des points ou des systèmes sont deux formes de l'énergie.

On démontre en mécanique que si un système de points en mouvement n'est soumis à l'action d'aucune force, la force vive qu'il possède ne peut se modifier. Les vitesses des divers points qui constituent le système peuvent varier individuellement, mais les variations sont telles qu'il y a nécessairement et exactement compensation entre les accroissements et les diminutions des forces vives des différents points. On peut écrire dans ce cas

$$\Sigma mv^2 = \text{constante}.$$

Mais il n'en est plus ainsi en général si des forces sont appliquées au système considéré : il y a alors une relation remarquable entre la variation de la force vive et les travaux des forces.

Désignons par Σmv_0^2 la force vive initiale du système, celle qu'il possédait au début de l'action, et par Σmv^2 la force vive finale, celle que le système possède à la fin de l'action; désignons d'autre part par $\Sigma\mathfrak{T}\mathrm{F}$ la somme *algébrique* des travaux des diverses forces appliquées au système; on démontre qu'on a la relation suivante :

$$\frac{1}{2}(\Sigma mv^2 - \Sigma mv_0^2) = \Sigma\mathfrak{T}\mathrm{F}$$

qui s'énonce ainsi :

La demi-variation de force vive d'un système pendant un certain temps est égale à la somme algébrique des travaux des forces appliquées au système dans le même temps.

Inversement, si les forces appliquées au système avaient produit exté-

rieurement le même travail, la force vive aurait passé de la valeur $\frac{1}{2}\Sigma mv_2$ à la valeur $\frac{1}{2}\Sigma mv_0^2$. En appliquant l'équation précédente à ce système, on a donc :

$$\frac{1}{2}\Sigma mv^2 + \Sigma \mathfrak{T} F = \frac{1}{2}\Sigma mv_0^2.$$

La force vive initiale du système est une quantité fixe, déterminée : le second membre est constant, il en est donc de même du premier. On peut donc énoncer la propriété suivante :

Dans un système en mouvement auquel sont appliquées des forces, la somme de la demi-force vive du système et des travaux de force est invariable.

Si donc nous prenons la demi-force vive pour mesure de l'énergie correspondante au mouvement du système, on voit que, dans le cas indiqué, la somme des formes de l'énergie est constante.

C'est là ce qui constitue, en mécanique, le principe de la conservation de l'énergie.

La vérification expérimentale de ce principe ne peut être réalisée : lorsque l'on arrive à faire des mesures précises, on reconnaît que la somme totale de l'énergie diminue dans toute action mécanique.

Mais il faut remarquer qu'il n'y a *jamais* d'action qui soit exclusivement mécanique : toute action de ce genre est accompagnée de manifestations diverses : manifestations calorifiques, manifestations électriques, etc.

Or celles-ci sont également susceptibles, dans des conditions convenablement choisies, de produire des actions diverses et en particulier des actions mécaniques : on peut donc dire que ce sont des formes de l'énergie, et dès lors, généralisant, étendant le principe de la conservation de l'énergie, on est conduit à se demander si les pertes d'énergie de forme mécanique que l'expérience constate ne sont pas compensées par l'apparition d'autres formes de l'énergie.

Pour admettre qu'il puisse en être ainsi, il faut que les diverses formes de l'énergie soient susceptibles de se transformer les unes dans les autres. En est-il réellement ainsi ?

Le fait est maintenant hors de doute : il a été démontré pour la chaleur presque simultanément par Colding, par Joule et par Mayer. Il est prouvé qu'il y a possibilité de transformation réciproque du travail mécanique et de la chaleur et que cette transformation se fait par voie d'équivalence, c'est-à-dire qu'il y a proportionnalité entre les quantités de chaleur apparue ou disparue et le travail disparu ou apparu, tant qu'il ne se manifeste d'autre action que des phénomènes mécaniques et calorifiques.

Cette notion, qui a été généralisée, est une des plus fécondes qui aient été introduites dans la science.

On a pu évaluer numériquement la relation qui existe entre les formes mécaniques et calorifiques de l'énergie : on a reconnu que, dans les transformations réciproques qui ont lieu, 1 calorie correspond à 425 kilogram-

mètres (1). Ce nombre est ce qu'on appelle l'*équivalent mécanique de la calorie* ou, plus communément, quoique moins exactement, *équivalent mécanique de la chaleur*. Nous le désignerons par la lettre E.

Nous pouvons alors étendre l'équation de la conservation de l'énergie : soit C la variation de quantité de chaleur éprouvée par le système considéré (variation positive ou négative suivant que le système gagne ou perd de la chaleur), cette variation correspondra à une quantité d'énergie mécanique, évaluée en kilogrammètres, égale à EC. Si les forces vives et les travaux de forces ont été également évalués en kilogrammètres, puisque ce qui apparaît ou disparaît en énergie mécanique disparaît ou apparaît en énergie calorifique, on doit avoir :

$$\frac{1}{2}\Sigma mv^2 + \Sigma \mathfrak{T} F + EC = \text{constante}.$$

On conçoit que cette équation pourrait être complétée d'une façon analogue pour d'autres formes de l'énergie.

Quelle que soit la forme de l'énergie que l'on emploie pour produire un effet, il est rare que la totalité de cette énergie serve effectivement : presque toujours une partie seulement est utilisée à produire l'effet cherché ; l'autre partie se transformant en donnant naissance à des effets d'autre nature. Soit, dans une opération quelconque, W la valeur de l'énergie employée, soit W′ celle de l'énergie effectivement utilisée, le rapport $\frac{W'}{W}$ est ce qu'on appelle le *rendement* dans l'opération considérée : on peut dire qu'il caractérise la perfection de l'opération, qu'il est la fraction de perfection, sa valeur devenant égale à 1, si $W'=W$, c'est-à-dire si toute l'énergie employée était utilisée à produire l'effet cherché, et étant d'autant plus faible qu'une moindre quantité d'énergie est utilement employée.

4. — On désigne sous le nom de moteur en général un système qui, recevant de l'énergie sous une forme quelconque, est susceptible de produire du travail mécanique. Les moteurs se différencient les uns des autres par la forme de l'énergie qu'ils reçoivent.

On désigne sous le nom de rendement du moteur le rapport entre le travail produit et la quantité d'énergie reçue, ces deux éléments étant évalués, par équivalence, comme s'ils étaient de même nature, ce qui n'est pas toujours.

On peut déterminer la quantité de travail produit après un temps quelconque ; mais, en général, l'action étant régulière, uniforme, il suffit de connaître la quantité produite pendant l'unité de temps : c'est ce qu'on appelle la *puissance* du moteur.

Nous n'insisterons pas sur la définition des unités mécaniques théoriques, unités CGS, et nous bornerons aux unités pratiques.

L'unité de force est le *kilogramme* qui est le poids dans le vide, à Paris, au niveau de la mer, d'un décimètre cube d'eau distillée à la température de 4 degrés.

L'unité de travail est le *kilogrammètre*, quantité de travail nécessaire pour

(1) Pour la définition de ces unités, voir un traité élémentaire de physique.

élever un poids de 1 kilogramme à une hauteur verticale de 1 mètre.

L'unité de puissance est le *poncelet* : c'est la puissance d'un moteur qui produit 100 kilogrammètres en une seconde. On utilise encore une ancienne unité, dite le *cheval vapeur*, qui est la puissance d'un moteur qui produit 75 kilogrammètres en une seconde. On voit que le cheval vapeur représente les trois quarts du Poncelet

Il est évident que quand on connaît la puissance d'un moteur (marchant régulièrement) on a le travail évalué en kilogrammètres produit en un certain temps en multipliant la puissance évaluée en poncelets par le nombre de secondes contenues dans le temps considéré et par le nombre 100.

5. — Les actions mécaniques que l'homme et les animaux peuvent exercer sont de diverses natures : tantôt elles ont pour effet de maintenir un corps en équilibre en s'opposant à l'action de certaines forces; tantôt elles ont pour effet de produire ou de modifier le mouvement d'un corps (il importe de remarquer que la déformation et la rupture des corps rentrent dans ce cas). La distinction est importante au point de vue mécanique, puisque, dans le premier cas, il n'y a pas production de travail, il n'y a pas dépense d'énergie ; cependant, même dans ce cas, les êtres vivants dépensent de l'énergie. Nous aurons à revenir ultérieurement sur ce point; mais nous considérerons d'abord les conditions des phénomènes qui se produisent, sans nous occuper des causes qui peuvent intervenir.

Quoique l'homme, que nous étudierons plus spécialement, puisse maintenir en équilibre des corps soumis à des forces de direction quelconque, au moins dans une certaine mesure, le cas le plus ordinaire et le plus intéressant est celui où il s'oppose à l'action de la pesanteur, où il empêche la chute de corps pesants, soit qu'il supporte des masses sur sa tête, sur ses épaules, soit qu'il les soutienne au bout de son bras.

Si le corps de l'homme constituait un solide invariable, les conditions de l'équilibre seraient fort simples : il faudrait et il suffirait que la verticale du système constitué par l'homme et par la masse supportée tombât à l'intérieur du polygone de sustentation, d'une part, et que, d'autre part, les diverses parties soumises à l'action de cette masse eussent une résistance suffisante pour ne pas être écrasées ou rompues par le poids de la masse.

Dans le cas, par exemple, où un homme porte un fardeau sur sa tête, l'action du poids de celui-ci est transmise au sol par des os et par des cartilages : il faudrait qu'en aucun point la force transmise ne dépassât la résistance de ces parties à l'écrasement. S'il s'agit d'un fardeau porté par le bras tombant verticalement, il faudrait, d'une part, que les os et les ligaments articulaires ne pussent être rompus par la charge dont ils transmettent l'action à l'épaule et par là au reste du corps et que, de plus, comme précédemment, la colonne vertébrale, les os du bassin et du membre inférieur résistassent à l'écrasement.

Nous avons donné, d'autre part, quelques indications sur la résistance à la rupture et à l'écrasement de certains tissus ou de certains organes, et ces indications permettraient alors de se rendre compte de ce qui doit se passer dans un cas déterminé.

Mais, en réalité, la question est loin d'être aussi simple, parce que le corps de l'homme constitue un système articulé et qu'il faut que chacune des parties qui le composent reste en équilibre : aussi, dans la plupart des cas, pour ne pas dire toujours, faut-il faire intervenir, en plus de la résistance des os et des muscles, l'action musculaire proprement dite.

6. — Le cas le plus simple est celui dans lequel l'homme ne subit l'action d'aucune force étrangère et où, seuls, interviennent les poids des diverses parties de son corps. Mais, dans ce cas même, les circonstances sont très différentes suivant la position, comme nous allons l'indiquer. Disons immédiatement que dans ce cas il n'y a pas, en général, à se préoccuper de la résistance des os ou des ligaments, qui est toujours suffisante.

Il n'y a qu'une position simple pour laquelle l'homme n'a à exercer aucun effort pour rester en équilibre, c'est la position couchée (nous laissons de côté des positions complexes présentant le même caractère, comme, par exemple, celle d'un homme assis, les pieds posant par terre et le dos et la tête reposant sur un plan convenablement incliné); disons que si ce cas se produit à l'état de sommeil, il n'en est pas toujours ainsi à l'état de veille et qu'il faut y prêter une certaine attention pour qu'il y ait relâchement musculaire complet.

L'équilibre a lieu dans ce cas parce que les réactions de la surface sur laquelle on est couché contre-balancent les poids des diverses parties du corps : ces réactions se manifestent en tous les points de contact du corps et de la surface du point d'appui. Pour une partie déterminée du corps, le tronc par exemple, la somme des réactions est égale au poids de ce tronc; mais la force qui agit par unité de surface, et c'est celle qui intervient au point de vue des effets produits, dépend de l'étendue de la surface de contact, étant d'autant plus faible que cette étendue est plus considérable. De là vient que l'on éprouve une sensation désagréable si l'on est couché sur un corps dur, rigide, parce que le contact ne s'établit que sur des parties restreintes; à cause de la valeur notable de la pression, la circulation est gênée. Aussi, si l'action se prolonge et que l'individu soit affaibli par la maladie, il peut en résulter des troubles, des escarres.

Si, au contraire, on est couché sur un corps qui se laisse facilement déformer, comme un matelas récemment cardé, les surfaces de contact sont très étendues et la pression par unité de surface est faible : mais, quelle que soit la flexibilité des matelas, elle varie d'un point à l'autre et peut, en certains cas, atteindre des valeurs qui soient susceptibles d'amener des désastres chez des malades. Mais il n'en est plus ainsi dans le cas du matelas d'eau, qui est constitué par une enveloppe en caoutchouc dans laquelle on a introduit une quantité d'eau suffisante pour distendre complètement l'enveloppe. Dans ce cas, à cause de la propriété des liquides de transmettre également la pression, celle-ci conserve la même valeur en tous les points, ce qui évite la production d'escarre, même chez des malades très affaiblis.

7. — Considérons maintenant un homme en station debout et examinons quelles conditions doivent être réalisées pour que les diverses parties du système articulé qu'il constitue puissent être en équilibre.

La condition la plus simple que l'on rencontre est celle du membre supé-

rieur, système pesant suspendu par sa partie supérieure : un pareil système, composé de plusieurs articles, abandonné à lui-même, arrive spontanément à une position d'équilibre, pourvu que les parties qui établissent les liaisons entre les divers articles et avec le support présentent une résistance suffisante : ici, ces parties sont les ligaments articulaires dont la résistance est bien supérieure au poids du membre. Si donc l'épaule est fixée, le membre supérieur se maintiendra de lui-même en équilibre.

Mais il n'en est pas de même des autres parties du corps, ainsi qu'il est facile de le voir, sans entrer dans des détails qui nous écarteraient du sujet que nous voulons traiter.

On sait, en effet, que la tête repose par une surface peu étendue sur la colonne vertébrale et que la verticale de son centre de gravité passe en avant des surfaces articulaires : l'équilibre ne peut donc subsister que s'il intervient une force qui contre-balance l'action de la pesanteur : cette force résulte de la mise en action des muscles qui s'insèrent à la nuque. Sans insister, nous dirons que le fait est prouvé, parce que lorsqu'un individu s'endort dans la position assise, on voit sa tête s'incliner en avant, par suite du relâchement des muscles.

Si, pour simplifier la question, nous supposons la tête invariablement liée à la colonne vertébrale et que nous admettions que celle-ci est absolument rigide, nous aurons à considérer la verticale du centre de gravité de toute la partie supérieure du corps : tête, tronc et membres supérieurs. L'équilibre ne pourra exister librement que si cette verticale tombe à l'intérieur de la base de sustentation qui est déterminée par les appuis du bassin sur les têtes de fémur, ce qui constitue une surface de sustentation assez étendue dans le sens de la largeur, mais très étroite dans la direction d'avant en arrière : aussi l'équilibre, s'il existait, serait très peu stable ; mais il semble, car il y a encore des incertitudes sur ce point, que l'équilibre n'existe pas spontanément et qu'il est non seulement assuré, mais produit par l'action musculaire, probablement celle du psoas iliaque.

En réalité, la question est bien moins simple à cause de la forme et de la flexibilité relative de la colonne vertébrale. Celle-ci n'agit pas comme une tige rigide qui transmet l'action sans modification d'une extrémité à l'autre, ni même comme une succession de pièces cylindriques à bases horizontales, placées verticalement les unes au-dessus des autres, qui, dans ce cas, au point de vue de la transmission des pressions, se comporteraient comme une pièce rigide. Les vertèbres, mobiles les unes sur les autres et soumises à une force, celle de la pesanteur, qui agit en avant de la colonne vertébrale, tendraient à se déplacer et la forme de la colonne vertébrale serait modifiée. On ne saurait attribuer la conservation de la forme qu'on observe dans la station debout par l'action des ligaments qui relient les vertèbres à leur partie postérieure, car l'observation montre que, si l'on s'abandonne, le corps s'affaisse et que la colonne vertébrale change de forme : ce n'est donc point une résistance invariable qui intervient dans la station debout, et la conservation de la forme de la colonne vertébrale doit être attribuée aussi à la contraction musculaire.

Il nous paraît inutile d'insister en montrant que des considérations analogues interviennent pour l'articulation du genou.

Si le corps était de forme invariable, si, notamment, la jambe était reliée invariablement au pied, le maintien de l'équilibre sur le sol serait facile à concevoir, car la base de sustentation, déterminée par les pieds, est une surface trapézoïdale assez étendue pour que la verticale du centre de gravité puisse y tomber aisément; mais la question n'est pas aussi simple, car, entre les jambes et le pied, il y a l'articulation tibio-tarsienne qui correspond à une base de sustentation peu étendue : la verticale du centre de gravité passe en avant de cette surface autour de laquelle le corps a une tendance à tourner en tombant en avant, ce qu'il ferait si l'action de la pesanteur n'était contrebalancée par celle des muscles jumeaux et du soléaire.

En résumé, dans le cas le plus simple, celui de la station debout, symétrique, le corps ne peut se maintenir en équilibre que grâce à la mise en action de certains muscles.

Il est facile de comprendre qu'il en serait de même pour le cas de stations debout moins simples, comme, par exemple, la station hanchée, etc.

Le fait de porter un fardeau sur la tête, sur les épaules,... modifie l'action de la pesanteur et change, non seulement la grandeur des forces qu'elle fait naître, mais aussi leur point d'application : mais les considérations générales précédentes trouvent également leur application et l'équilibre ne peut subsister que grâce à l'action musculaire.

A plus forte raison, en est-il ainsi lorsque le corps ne se trouve pas dans la position debout, la position du soldat sans arme. Si, par exemple, il lève le bras pour le maintenir horizontal, il en résulte un changement dans le mode d'action de la pesanteur sur l'ensemble du corps et il doit en résulter nécessairement une modification dans les actions musculaires; mais, de plus, il faut que le bras, qui n'est plus suspendu et dont le poids n'est plus contrebalancé par la résistance des points de suspension, conserve sa position, ce qui exige la mise en action de muscles jusque-là inactifs. Plus exactement, cette action ne se manifeste pas pour le bras dans son entier, mais se manifeste séparément sur chacune des parties, mobiles les unes sur les autres, qui le constituent.

Il est clair que cette action doit se manifester de même, à plus forte raison, si un poids est supporté à l'extrémité du bras.

Il en serait de même pour toute attitude que l'on donne au corps et qui, sauf la station couchée, comme nous l'avons dit, ne peut subsister que par suite de l'intervention de l'action musculaire.

En dehors de cette position, la station couchée, et de la station assise, on peut signaler, comme donnant lieu au minimum de l'intervention musculaire, la position d'un homme suspendu à un trapèze et laissant tomber la tête en avant : ici, toutes les parties du corps sont librement suspendues et prennent spontanément une position d'équilibre sous l'action de la pesanteur, sans l'intervention d'aucune force étrangère; seuls, les muscles des mains doivent entrer en action pour serrer la barre du trapèze : mais cette action pourrait même être supprimée en suspendant le corps par des liens fixés aux poignets.

En résumé, et sauf des cas exceptionnels, on peut dire que le maintien en équilibre dans une attitude quelconque exige l'intervention de l'action musculaire.

Il va sans dire, sans qu'il soit nécessaire de nous y arrêter, que ce résultat est applicable à tous les animaux, à l'exception de ceux qui vivent au sein de l'eau et qui, recevant de celle-ci une poussée, peuvent rester en équilibre d'une façon tout à fait passive.

8. — Il est à remarquer que, dans le cas de l'équilibre que nous supposons, les diverses parties du corps sont immobiles, les points d'application des forces, des forces musculaires, ne se déplacent pas. Il n'y a donc pas production de travail mécanique, il ne doit pas y avoir dépense d'énergie.

Ce dernier résultat est bien celui qui se manifeste dans le cas de l'équilibre des corps non vivants ; plaçons un corps pesant sur une table : l'action du poids du corps sera contre-balancée par la résistance de cette table, résistance due aux forces élastiques qui prennent naissance par suite des déformations excessivement petites et qui ne se manifestent pas d'une manière appréciable. Si l'on vient à enlever le poids, la table reprend absolument sa forme primitive (si la limite d'élasticité n'a pas été dépassée) : tout se retrouve dans le même état qu'au début. Il n'y a pas eu dépense de travail mécanique, d'énergie, ce qui est bien conforme à la théorie, et cela quel que soit le temps pendant lequel l'action s'est produite.

En est-il de même dans le cas des êtres vivants? Un homme qui soutient un poids à bras tendus ou en pliant l'avant-bras sur le bras dépense-t-il de l'énergie ? Et si oui, à quoi correspond cette énergie, puisqu'il n'y a pas production de travail mécanique ?

Des recherches fort intéressantes ont été faites par M. Chauveau sur les phénomènes qui accompagnent la contraction statique des muscles, c'est-à-dire le maintien à l'état de repos d'un muscle contracté.

L'individu en expérience est assis sur un siège reposant sur un plateau dans lequel est implantée solidement une colonne qui sert d'appui à la face postérieure du bras, qui est ainsi maintenu vertical. L'avant-bras est amené à la position horizontale qu'il devra conserver lorsqu'on placera dans la main des poids de diverses valeurs. Un thermomètre sensible, appliqué sur la peau et soustrait à l'action directe de l'air, donne la température du muscle de biceps : la marche du thermomètre est notée de minute en minute.

La température ayant été soigneusement déterminée quand le muscle ne présente que la contraction nécessaire pour maintenir l'avant-bras horizontal, on fait soutenir à l'individu une charge déterminée pendant un certain temps, deux minutes par exemple, après lequel on enlève la charge, tout en continuant à observer la marche du thermomètre. L'expérience montre que la température s'abaisse pendant l'action de la charge pour s'élever lorsqu'on enlève celle-ci, l'élévation continuant pendant dix minutes environ.

Que se produit-il dans ces conditions? si le muscle n'était pas contractile, mais seulement élastique, l'effet d'une charge serait de l'allonger et, par suite, l'avant-bras ne pourrait rester horizontal et le déplacement serait d'autant plus grand que la charge serait plus considérable. Le maintien du bras dans

la position initiale est nécessairement dû à une augmentation de la contraction du muscle, augmentation égale en valeur à l'allongement qu'aurait subi le muscle en vertu de son élasticité seule.

La contraction qui se manifeste a, entre autres effets, celui de comprimer les vaisseaux capillaires du tissu musculaire ; par là, celui-ci, ne recevant plus autant de sang, liquide qui lui apporte et lui fournit la chaleur, doit se refroidir, car les causes de refroidissement extérieure n'ont pas été modifiées. C'est à cette cause qu'est dû l'abaissement de température qu'on observe pendant la contraction.

« Mais l'état d'activité du tissu musculaire, dit M. Chauveau, y détermine une activité considérable de la circulation. J'ai pu, avec la collaboration de M. Kaufmann, constater que le muscle reçoit en moyenne cinq fois plus de sang dans l'état d'activité que dans l'état de repos. Et ce n'est pas précisément quand le muscle est contracté que se manifeste cette accélération. Elle se montre surtout au moment du relâchement musculaire, lorsque les vaisseaux cessent d'être comprimés par le tissu propre du muscle. Cette suractivité de la circulation est en rapport avec la suractivité des combustions, source du travail physiologique du muscle. Elle est donc nécessairement proportionnelle à ce travail, puisqu'elle a pour objet l'apport au muscle, en quantité suffisante, de matériaux de ces combustions et l'entraînement des déchets qui en résultent. »

Nous n'avons voulu modifier en rien la citation que nous venons de faire; mais nous ne pouvons pas ne pas signaler, en le regrettant, l'emploi fait par M. Chauveau, avec d'autres physiologistes, du mot *travail*. Le mot *travail* a en mécanique, un sens trop précis pour qu'on puisse, sans inconvénient, l'employer dans un sens différent. L'addition de qualificatifs, *travail physiologique* ou *travail statique*, laisse subsister une cause de trouble, puisqu'il n'y a pas de travail, à proprement parler, dans les cas analogues à celui que nous venons d'indiquer : il eût été préférable d'adopter une autre expression pour représenter la dépense d'énergie occasionnée par le simple soutien d'une charge.

Pour éviter, à notre avis, toute ambiguïté, il suffirait de modifier comme suit les deux dernières phrases de la citation :

« Cette suractivité de la circulation est en rapport avec la suractivité des combustions, sources de l'énergie dépensée dans le muscle. Elle est donc nécessairement proportionnelle à cette énergie, puisqu'elle a pour objet l'apport au muscle, en quantité suffisante, des matériaux de ces combustions et l'entraînement des déchets qui en résultent. »

La suractivité de la circulation et des combustions explique l'élévation de température que l'on observe après la contraction, et l'on voit que cette élévation de température peut, jusqu'à un certain point, mesurer l'augmentation des combustions, donc l'énergie produite qui vient remplacer celle qui a été dépensée pendant la contraction.

Ajoutons que, dans les expériences que nous signalons, les élévations de température observées étaient d'autant plus grandes que les charges étaient plus considérables : il y a donc variation, sinon proportionnelle, au

moins dans le même sens, de la charge soutenue et de l'énergie dépensée.

9. — M. Chauveau, en collaboration avec M. Tissot, a étudié les variations de l'énergie dépensée dans le cas de la contraction musculaire statique, c'est-à-dire dans le cas du soutien des charges en une position invariable, sans déplacement. Dans cette nouvelle série de recherches, il s'est basé sur l'activité des échanges respiratoires. Dans ces expériences, il étudiait les variations des échanges gazeux en faisant varier tantôt la charge soutenue, tantôt la position de l'avant-bras, et par conséquent le degré de contraction des muscles fléchisseurs de l'avant-bras, et, tantôt aussi, les deux éléments à la fois. Des résultats obtenus, M. Chauveau déduit la conclusion suivante, qui concorde d'ailleurs avec les autres expériences qu'il a faites.

La dépense d'énergie dans un muscle en état de contraction statique est proportionnelle à la charge supportée et au degré de raccourcissement du muscle sustenseur.

Ce résultat est très intéressant et montre que les phénomènes qui se manifestent ne peuvent être assimilés aux actions mécaniques qu'on serait porté à leur comparer. En effet, quelle que soit la position du muscle, il n'y a pas production de travail mécanique, puisque le poids soutenu reste à un niveau invariable. Or, non seulement il y a dépense d'énergie, mais cette dépense n'est pas la même dans les divers cas.

On peut donner une autre preuve, moins précise, mais non sans valeur, cependant, de la dépense d'énergie correspondant au soutien statique d'une charge : c'est la fatigue qui se produit et qui croît, non seulement avec la charge, mais aussi avec le temps. Or, la sensation de fatigue est liée à la désassimilation des tissus de l'organisme et, par suite, à la disparition d'une certaine quantité d'énergie.

Il semble donc bien prouvé que toute contraction statique, tout soutien d'une charge au repos, quoique ne correspondant pas à la production d'un travail mécanique, comporte une dépense d'énergie.

Pourquoi cette dépense d'énergie pour le soutien d'une charge par un être vivant, tandis qu'aucune dépense n'est nécessaire si le support est un être inanimé ? Pour M. Chauveau, la dépense d'énergie qui se manifeste est utilisée à modifier les propriétés du muscle, c'est-à-dire à modifier ses propriétés de manière à le rendre susceptible de ne pas subir une augmentation d'allongement, malgré l'accroissement de la charge.

L'idée qu'une modification de ce genre exige une dépense d'énergie est très plausible et un effet de ce genre peut parfaitement exister. Mais il ne nous paraît pas suffire : il doit falloir une dépense d'énergie pour modifier les propriétés du muscle ; mais on ne voit pas comment et pourquoi il en faudrait pour maintenir sans modification les propriétés acquises. Cependant, l'observation montre que la dépense d'énergie croît avec le temps, elle est continue, elle persiste sans produire aucun effet, puisque, dès le début, le corps a acquis des propriétés élastiques qui ne changent plus.

10. — Il semble donc qu'il y a contradiction entre les faits observés et les conséquences déduites de l'application des théorèmes de la mécanique.

Nous croyons que la contradiction provient de ce que l'on a voulu com-

parer des données qui ne sont pas comparables. D'un côté, au point de vue mécanique, on considère un système qui est en équilibre ; en physiologie il n'y a pas, pour l'être vivant, équilibre à proprement parler et il s'agit plutôt d'un système qui est à l'état *stationnaire*, pour employer une expression empruntée à la physique.

Il est facile de concevoir, au point de vue mécanique, un système à l'état stationnaire également dans lequel le maintien à cet état exige une dépense d'énergie, cette dépense variant avec la charge rapportée avec le temps.

Considérons une conduite parcourue par un courant d'eau et admettons que, par un procédé quelconque, on puisse faire varier la pression dans cette conduite. Relions à celle-ci un corps de pompe vertical dans lequel peut se mouvoir un piston : celui-ci, par le fait même de la pression exercée dans le corps de pompe par le liquide, se maintiendra à un certain niveau. Ajoutons une charge sur le piston ; elle aura pour effet de faire descendre celui-ci d'une certaine quantité. Mais il nous sera possible de le maintenir au niveau primitif, malgré la charge qu'il supporte, à la condition de faire croître d'une quantité convenable la pression dans la conduite. Le piston et la charge resteront en équilibre ; mais on ne peut dire que le système entier est en équilibre. Si nous ne considérons que le piston et la charge, il n'y a pas de travail produit ; et cependant il y a eu augmentation de la dépense d'énergie par suite de l'accroissement de la pression du liquide. Il y a, pour l'ensemble, un état stationnaire, qui n'est pas le même que lorsque la charge n'avait pas été ajoutée, et qui ne se maintient que par une dépense continue d'énergie.

Si le corps de pompe avait été relié à une conduite fermée, remplie d'un liquide au repos, lorsqu'on aurait ajouté une charge sur le piston, il aurait fallu accroître la pression pour maintenir le piston au même niveau ; mais, à partir de cet instant, il y aurait eu équilibre à proprement parler et il n'y aurait eu aucune dépense d'énergie quelque longtemps que se soit prolongée l'expérience.

Ce cas est comparable au cas d'une charge supportée par un appui solide inanimé : après la déformation qui se produit, l'équilibre subsiste indéfiniment sans aucune dépense d'énergie.

Le cas précédent nous paraît comparable au cas du soutien d'une charge par un être vivant : la charge reste immobile, mais on ne saurait dire que le système est en *équilibre* au sens général du mot, puisque le corps d'un être vivant est constamment le siège de phénomènes chimiques, calorifiques et, peut-être, électriques. Il nous semble donc qu'on peut concevoir sans difficulté qu'il y ait, dans un cas comme dans l'autre, une dépense d'énergie variable avec la charge et croissant avec le temps.

Il est vrai que, dans l'exemple matériel que nous avons imaginé, nous voyons immédiatement à quelle cause est dû l'accroissement de la dépense d'énergie, puisqu'elle est liée aux changements des conditions de l'écoulement de l'eau. Nous ne pouvons dire avec la même netteté ce qui se passe pour le cas des êtres vivants ; nous avons dit que l'explication fournie par M. Chauveau ne nous paraissait pas satisfaisante sous la forme sous laquelle

il l'a présentée, au moins comme nous l'avons comprise ; peut-être, cependant, serait-il possible d'en développer les conséquences de manière à résoudre la question.

Mais nous n'avons pu voir encore comment on pourrait y arriver ; cela ne veut pas dire que ce ne soit pas de ce côté qu'on doive chercher la solution du problème.

Nous avons insisté un peu longuement sur cette question de la dépense d'énergie correspondant à la contraction statique des muscles, parce que le désaccord apparent qui se manifeste entre les résultats de l'expérience et les conséquences déduites de la mécanique pourrait faire penser, comme on l'a dit quelquefois, que les êtres vivants n'obéissaient pas aux principes qui régissent les actions qui se manifestent pour les corps inanimés. Il était important de montrer que, dans ce cas comme dans tous les autres analogues, il n'y a pas contradiction. Il faut seulement ne pas se borner à un examen superficiel du problème, mais tenir compte de *toutes* les conditions qui se présentent chez les êtres vivants ; et cela est souvent fort difficile. Il ne faut pas, d'autre part, ne vouloir étudier qu'un mode d'action déterminé, ne vouloir considérer que les phénomènes de repos et de mouvement, ne vouloir se restreindre qu'aux applications de la mécanique ; il faut faire entrer en ligne de compte toutes les actions produites, de quelque nature qu'elles soient, il faut étudier les phénomènes en utilisant toutes les données fournies par l'énergétique.

11. — Quoique l'étude de l'action des muscles à l'état de contraction statique, produisant l'équilibre, présente un intérêt réel, celle de l'action des muscles produisant du travail mécanique mérite, également au moins, d'appeler l'attention. Cette dernière présente même plus d'importance au point de vue des applications pratiques.

Le travail produit, lors d'un mouvement dû à la contraction musculaire, dépend de la grandeur de la force qui mesure l'action produite : il y a donc lieu d'étudier celle-ci. De même pour la grandeur du déplacement.

Il faut également étudier la puissance dont on peut disposer lors d'une action déterminée.

Enfin, les êtres vivants sont des moteurs qui ne peuvent être utilisés d'une manière continue : il y a une somme de travail produit au delà de laquelle ils doivent se reposer.

Il y a trois ordres différents de questions que nous examinerons successivement.

Enfin, sans rechercher l'origine de l'énergie produite, question étudiée d'autre part, nous aurons à comparer le travail utile produit dans diverses circonstances à l'énergie employée pour produire ce travail et examiner la question de rendement.

La première question qui se pose dans l'étude des actions mécaniques d'un muscle, c'est de savoir quelle force il peut développer lorsqu'il se contracte au maximum ; c'est ce qu'on a appelé quelquefois la force absolue du muscle. Le plus souvent on l'évalue en la comparant à un poids, soit que l'on détermine le poids qu'un muscle déterminé peut maintenir soulevé pendant sa

contraction, soit qu'on évalue le poids qu'il peut soulever au moment de sa contraction.

La seconde méthode, qui a été souvent employée, exige qu'on opère avec certaines précautions. Il faut, en effet, pour que les valeurs trouvées soient exactes que le mouvement produit soit lent. Soient P le poids soulevé, F la force développée par la contraction du muscle, h la hauteur dont le poids est soulevé, h' le raccourcissement du muscle : ces quantités sont égales lorsqu'on opère sur un muscle détaché du corps et agissant directement sur le poids. Il n'en est plus de même dans le cas d'un individu vivant : le muscle ne s'insère pas au point où est fixé le poids à son lever. En général, l'action se transmet par un levier osseux et si l et l' sont les bras de levier correspondant au poids et au muscle, on a $\frac{h}{h'} = \frac{l}{l'}$. Les travaux, l'un positif, l'autre négatif, du poids et du muscle, sont respectivement $\mathrm{P}h$ et $\mathrm{F}h'$.

Le poids soulevé part du repos : il est mis en mouvement, et soit v la vitesse qu'il a acquise après un certain temps. En appliquant l'équation des forces vives, on a :

$$\frac{1}{2} mv^2 = \mathrm{F}h' - \mathrm{P}h$$

d'où l'on déduit :

$$\mathrm{F}h' = \mathrm{P}h + \frac{1}{2} mv^2.$$

Si la vitesse est assez petite pour qu'on puisse la négliger, il reste :

$$\mathrm{F}h' = \mathrm{P}h$$

qui est la condition qu'on trouverait si les forces F et P étaient effectivement en équilibre, puisqu'elle peut s'écrire

$$\frac{\mathrm{F}}{\mathrm{P}} = \frac{h}{h'} \quad \text{ou} \quad \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{P}} = \frac{l}{l'}$$

ce qui est la condition d'équilibre du levier. En particulier, si le muscle agit directement sur le poids, on a $h = h'$ et il vient :

$$\mathrm{F} = \mathrm{P}.$$

Mais, si la vitesse n'est pas petite, il faut tenir compte du terme $\frac{1}{2\,h'} m\,v^2$ qui représente la force vive acquise, et la valeur du poids soulevé ne peut sans erreur permettre de calculer directement la force musculaire. Appelons P′ le poids qui serait maintenu en équilibre par la force F ; sa valeur est donnée par l'équation

$$\mathrm{F}h' = \mathrm{P}'h.$$

Comparons cette équation à l'équation générale, il vient :

$$P'h = Ph + \frac{1}{2} mv^2$$

ou

$$P' = P + \frac{1}{2h} mv^2.$$

Le poids P′ qui pourrait être maintenu à l'état d'équilibre est plus grand que le poids P soulevé de la quantité $\frac{1}{2h} mv^2$. La différence dépend de v, c'est-à-dire des conditions de l'expérience.

Lorsque l'expérience consiste à faire soulever un poids par un homme, on peut la régler de manière que v reste très petit et se servir de l'équation simplifiée. Il n'en est pas de même, en général, lorsqu'on opère sur un muscle détaché du corps dont on provoque la contraction artificiellement, par l'action d'une décharge électrique, par exemple.

Il est à peine besoin de faire remarquer que lorsque, par la contraction musculaire, on soulève ou on maintient un poids, on soulève ou on maintient en même temps le membre en expérience, dont l'influence ne peut être négligée. Cela revient à ajouter un terme à celui qui représente le travail négatif : si π est le poids du membre et δ la quantité dont est soulevé le centre de gravité, ce terme est $\omega \delta$ et l'équation devient :

$$\frac{1}{2} mv^2 = Fh' - Ph - \pi\delta.$$

Si, d'autre part, λ est la distance du centre de gravité au point autour duquel se fait la rotation du muscle, on a évidemment :

$$\frac{l}{h} = \frac{l'}{h'} = \frac{\lambda}{\delta}$$

Si on peut négliger la force vive, l'équation devient

$$Fh' = Ph + \pi\delta$$

ou

$$Fl' = Pl + \pi\delta$$

plus commode, car les longueurs l, l' et δ peuvent se mesurer à l'état de repos, tandis que les quantités h, h' et δ sont peu aisées à déterminer directement.

Borelli (1680) paraît être le premier qui ait cherché à déterminer la valeur des forces qui sont produites par la contraction des divers muscles. Les résultats qu'il a donnés manquent de précision : outre qu'on ne connaît pas exactement la valeur de l'unité de poids dont il faisait usage, il n'a pas mesuré avec assez de soin les bras des leviers et il a commis des erreurs sur lesquelles il est inutile d'insister. Haughton, en se servant des données fournies, corrigeant les erreurs de raisonnement, a introduit des corrections qui modifient

sensiblement les nombres de Borelli. Nous donnons ci-après les nombres corrigés :

Biceps	214	livres anglaises.
Brachial	186	—
Biceps fémoral, grêle semi-membraneux, semi-tendineux	678	—
Vastes externe et interne. Crural	814	—
Soléaire	407	—
Long fléchisseur du pouce	43	—
Temporal et masséter	180	—

12. — Il importe de remarquer que les nombres fournis par des expériences telles que celles auxquelles se rapporte le tableau précédent représentent, en somme, des résultantes d'actions musculaires élémentaires : en réalité, quand un muscle se contracte, chacune de ses fibres, en se raccourcissant, produit une force dont la valeur est faible et l'on observe seulement l'effet produit par l'action simultanée de toutes les fibres. Il serait intéressant de pouvoir déterminer la force élémentaire produite par une fibre ; connaissant alors le nombre de fibres contenues dans un muscle et leur disposition, on pourrait évaluer l'effet total.

La résultante se déterminerait par les règles ordinaires de la mécanique en tenant compte des diverses directions des forces. Dans le cas particulier où les fibres sont parallèles, la résultante est égale à la somme des forces élémentaires.

On ne peut déterminer la valeur de ces forces élémentaires, mais on peut déterminer un nombre qui peut la remplacer au point de vue pratique. Considérons un muscle dont les fibres sont parallèles : nous pouvons admettre que, sensiblement au moins, elles sont uniformément réparties. Si donc nous considérons une section transversale du muscle, le nombre des fibres sera proportionnel à la section. Si nous admettons que toutes les fibres développent séparément la même action, puisque la résultante est la somme de ces actions, nous voyons que la force du muscle doit être proportionnelle à la surface de la section. Si donc nous divisons la force totale par la surface évaluée en centimètres carrés, par exemple, nous aurons un nombre qui représentera la force d'un muscle qui aurait une section de surface égale à 1 centimètre carré.

Divers auteurs se sont occupés de déterminer ce que l'on pourrait appeler la *force spécifique* du muscle ; la méthode à employer découle de ce que nous venons d'indiquer : Il faut d'une part évaluer la force d'un muscle, comme nous l'avons dit plus haut, et, d'autre part, il faut évaluer la section. Le quotient des deux nombres donnera la valeur cherchée si les fibres du muscle peuvent être considérées comme parallèles.

Weber fit quelques expériences sur ce sujet qui, pour les jumeaux et le soléaire, lui donnèrent la valeur de 1 kilogramme par centimètre carré. En discutant ces expériences, Henke et Knorz trouvèrent qu'il y avait lieu d'y apporter des corrections à la suite desquelles le résultat fut trouvé de 4 kilogrammes par centimètre carré. Des expériences faites directement sur les mêmes muscles leur donnèrent 5 kilogrammes par centimètre carré, tandis

que d'autres, se rapportant aux biceps, au brachial antérieur et au long supinateur, portèrent cette valeur à $8^{kg},187$ pour la moyenne des deux bras. Ce coefficient fut trouvé égal à 9 kilogrammes par Koster qui opérait sur les jumeaux et le soléaire.

Enfin Haughton trouva $6^{kg},658$ par centimètre carré en opérant sur les fléchisseurs du bras et $7^{kg},780$ pour les fléchisseurs de la jambe.

Tout en étant du même ordre de grandeur, ces nombres sont assez différents les uns des autres, ce qui n'a rien d'étonnant, car il est probable que si, peut-être, chez un même individu la force spécifique peut avoir une valeur déterminée, elle doit varier avec les sujets en expérience.

En résumé, on aura une idée de la grandeur des effets produits en prenant la moyenne des valeurs obtenues par les divers observateurs. On peut donc dire que la force musculaire spécifique moyenne est de $7^{kg},5$ par centimètre carré.

Nous pensons qu'il n'est pas sans intérêt d'entrer dans quelques détails sur les expériences dont nous venons de citer les résultats. Nous décrirons d'abord l'expérience de Haughton sur les fléchisseurs du bras.

Le bras étant placé verticalement et l'avant-bras horizontalement, il cherchait quelle était la plus grande valeur du poids qui pouvait être soutenu sans qu'un mouvement se produisît : cette valeur fut trouvée égale à 39 livres ($17^{kg},669$). Ce poids agissait à une distance de 12^{po} 1/2 ($31^{cm},15$) du centre de rotation. Le poids de l'avant-bras et de la main doit entrer en ligne de compte, car son action s'ajoute à celle de la charge supportée.

Haughton estimait que son action équivalait à celle d'un poids de 2 livres (906 grammes) agissant à la même distance que la charge. La force qui tendait à abaisser l'avant-bras était donc ainsi de 41 livres ($18^{kg},573$).

Deux muscles s'opposent au mouvement de l'avant-bras : le biceps et le brachial antérieur dont les insertions sont respectivement à des distances de $1^{po},07$ ($2^{cm},72$) et $2^{po},06$ ($5^{cm},23$) du centre de rotation. Les sections de ces muscles furent évaluées à $1^{po.q},914$ ($12^{cm^2},35$) pour le biceps et $1^{po.q},276$ ($8^{cm^2},23$) pour le brachial. Ces données ne peuvent être obtenues sur le vivant, naturellement : mais Haughton se servit, pour les déterminer, de mesures faites sur le cadavre d'un forgeron bien musclé.

Si nous désignons par φ la force du muscle par centimètre carré, le biceps est susceptible de donner naissance à une force $\varphi \times 12,35$ et le brachial à une force $\varphi \times 8,23$.

Puisque ces forces peuvent équilibrer un poids de 41 livres placé dans la main, nous n'avons qu'à écrire l'équation d'équilibre du levier :

$$18,573 \times 31,115 = \varphi \times 12,35 \times 2,72 + \varphi \times 8,23 \times 5,23,$$

en en effectuant les calculs

$$577,9 = 22,19\varphi + 64,57\varphi = 86,96\varphi$$

ce qui donne enfin

$$\varphi = \frac{577,9}{86,96} = 6,650.$$

Dans le cas que nous venons d'indiquer, le levier est interpuissant, suivant l'expression consacrée : Rosenthal, dans les recherches sur le soléaire et les jumeaux, considérait un levier interrésistant : c'est la disposition qui se présente lorsqu'un homme se tient debout sur la pointe du pied : la partie en contact avec le sol constitue le point fixe, la résistance est le poids du corps et de la charge qu'il supporte, poids qui est appliqué à l'articulation tibio-tarsienne, et la puissance est représentée par l'action des muscles qui se fixent au calcanéum par l'intermédiaire des tendons d'Achille.

L'expérience consistait à charger de poids un homme debout sur la pointe du pied jusqu'à ce qu'il ne pût plus se tenir. Il y avait alors à écrire l'équation d'équilibre du levier dont la forme reste la même, quelle que soit la disposition des forces qui lui sont appliquées.

13. — La force développée par la contraction d'un muscle ne dépend pas seulement du nombre des fibres qui le constituent : ce résultat n'est vrai que pour le cas où les fibres peuvent être considérées comme parallèles, et lorsque le mouvement produit a la même direction, ce qui est précisément le cas des muscles sur lesquels ont été faites les expériences dont nous venons de parler. Mais d'autres conditions peuvent se présenter. Certains muscles sont, il est vrai, constitués par des fibres parallèles et la force qu'ils développent peut être évaluée comme nous l'avons dit ; mais par la manière dont ils s'insèrent, cette force n'est pas tout entière utilisée à produire le mouvement. Tel est, par exemple, le cas des intercostaux qui sont obliques par rapport aux côtes sur lesquelles ils s'insèrent, tandis que le mouvement que peuvent prendre celles-ci est normal à leur propre direction. Dans ce cas, la force n'agit pas tout entière : elle peut être ramenée à deux composantes, l'une parallèle aux côtes qui produit seulement une variation de pression sur l'articulation, l'autre perpendiculaire qui seule est efficace. Si φ est la force spécifique du muscle, S la section normale et α l'angle qu'il fait avec la direction des côtes, on reconnaît aisément que la composante utile est $\varphi S \sin \alpha$, quantité qui croît avec α.

Ce cas est également celui du rhomboïde qui, lorsque la colonne vertébrale est fixée, tend à en rapprocher l'omoplate.

Les muscles désignés sous le nom de penniformes ou pennatiformes, tels que le mylo-hyoïdien, peuvent donner lieu à une conclusion analogue : on peut en effet les considérer comme formés de deux muscles à fibres parallèles s'insérant obliquement sur la ligne médiane dont la direction est celle même du mouvement.

La question est moins simple pour les muscles triangulaires, car les fibres ont toutes des directions différentes et la section varie aux diverses distances du point d'insertion. Cependant cette dernière condition ne se présente pas toujours ; c'est ainsi que, dans le grand pectoral qui présente l'aspect triangulaire, la section est presque constante, ce qui tient à ce que l'épaisseur du muscle varie en raison inverse de sa largeur. Haughton, en effet, a trouvé pour l'aire de trois sections prises à des distances diffférentes du sommet les valeurs suivantes :

$$497^{mm^2} \qquad 495^{mm^2} \qquad 502^{mm^2}.$$

Les différences sont donc négligeables.

Dans ce cas, on reconnaît que la force a une direction qui est la bissectrice de l'angle formé par les bords du muscle. Le calcul montre que si φ est la force spécifique, S la surface constante des sections et θ l'angle que font entre elles les fibres extrêmes, la valeur de la force est

$$2\varphi S \frac{\sin\frac{\theta}{2}}{\theta}.$$

On peut avoir une idée de l'influence que présente cette disposition en remarquant que cette valeur est égale à φS quand θ est nul, c'est-à-dire quand les fibres sont parallèles, ce que l'on savait déjà, et qu'elle prend les valeurs $0{,}90\,\varphi S$ et $0{,}64\,\varphi S$ lorsque l'angle θ prend les valeurs 90° et 180°, c'est-à-dire quand, respectivement, les fibres extrêmes sont perpendiculaires entre elles ou quand elles sont sur le prolongement l'une de l'autre, le muscle occupant une demi-circonférence entière, la section restant la même, bien entendu.

Les muscles peuvent présenter d'autres formes, mais nous ne nous y arrêterons pas.

14. — L'action des muscles, comme nous l'avons dit, ne se borne pas à équilibrer des forces ; elle produit le déplacement de corps malgré l'action de forces antagonistes, elle produit du travail.

Le travail produit dépend de la force que l'on peut calculer pour un muscle donné, au moins dans certains cas, et du déplacement de l'une de ses extrémités, l'autre étant supposée fixée. Ce travail est donc variable dans chaque mouvement spécial ; mais il ne peut dépasser certaines limites, puisque la contraction du muscle est elle-même limitée.

Nous ne connaissons pas d'expériences précises ayant eu pour but d'évaluer le travail maximum que peut produire un muscle : les recherches que nous avons signalées précédemment permettent cependant de s'en faire une idée.

On peut admettre dans l'expérience d'Haughton (p. 981) que l'individu qui supportait un poids de 39 livres aurait pu le soulever lentement, presque sans vitesse : en tenant compte du poids de son bras, il aurait soulevé un poids de $18^{kg},573$. L'avant-bras, au début, pendait verticalement, il a pu être relevé jusqu'à devenir à peu près vertical en se redressant contre le bras. Le poids étant appliqué à une distance de $31^{cm},115$ du centre de l'articulation, le déplacement vertical peut donc être évalué à $2 \times 31{,}115 = 62^{cm},33$ et le travail était de

$$18{,}573 \times 0^{m},6233 = 11{,}25 \text{ kilogrammètres.}$$

Mais nous pouvons chercher le travail de chacun des muscles qui agissaient dans l'expérience, savoir le biceps et le brachial antérieur.

La force spécifique étant de $6^{kg},650$ et la section étant de $12^{cm^2},35$ pour le biceps et de $8^{cm^2},23$ pour le brachial, les forces que peuvent produire ces muscles sont respectivement

$$6{,}650 \times 12{,}35 = 82^{kg},127 \quad \text{et} \quad 6{,}650 \times 8{,}23 = 54^{kg},729.$$

Pour la même raison que nous avons indiquée pour le poids soutenu, le déplacement vertical des points d'insertion des muscles est le double de la distance de ces points au centre de rotation, soit $5^{cm},23$ pour le biceps, $2^{cm},72$ pour le brachial.

Dès lors le travail produit est

Pour le biceps	$82,127 \times 0,1048 = 8,19$	kilogrammètres.
Pour le brachial	$54,729 \times 0,0544 = 3,02$	—

La somme de ces deux valeurs reproduit, comme on devait s'y attendre, le travail nécessaire à l'élévation du poids total.

On peut chercher à se rendre compte de quels éléments dépend le maximum de travail qu'un muscle peut fournir.

Nous avons dit que la force développée est proportionnelle à la section S que nous supposons constante et peut être représentée par une expression de la forme φS, φ étant la force par centimètre carré qui paraît constante pour les divers muscles d'un même individu. Si λ représente le raccourcissement que subit le muscle en passant de l'état de repos à l'état de contraction maximum, le travail sera $\varphi\, S\, \lambda$.

Mais l'action de la contraction se manifestant dans toute l'étendue du muscle, le raccourcissement doit être proportionnel à la longueur D et peut se représenter par k L, k étant une constante. Le travail sera $k\, \varphi\, S\, L$.

Nous avons supposé le muscle cylindrique, puisque nous avons admis que S était constant. Le produit S L représente alors le volume V et le travail est représenté par $K\, \varphi\, V$. On voit donc que, au moins sur un même individu, les quantités de travail que les divers muscles peuvent produire sont proportionnelles aux volumes de ces muscles.

On reconnaît aisément que le résultat est le même dans le cas où le muscle n'est pas cylindrique.

La comparaison des quantités de travail se ramène donc à la comparaison des volumes des muscles ; mais il est plus simple de la ramener à la comparaison des poids, ce qui revient au même, les volumes et les poids étant proportionnels.

15. — Lorsqu'un muscle, après s'être contracté, est revenu à l'état de repos, il peut subir une nouvelle contraction et produire une quantité de travail égale à celle qu'il avait produite lors de la première contraction. Il ne faudrait pas croire que l'on peut répéter le même raisonnement pour un nombre quelconque de contractions et que le travail produit alors doit être proportionnel à ce nombre. Il n'en est ainsi que si, entre deux contractions successives, on laisse s'écouler un certain temps. En réalité, après une contraction, le muscle n'est pas physiologiquement dans l'état où il se trouvait au début, et, si les contractions se succèdent trop rapidement, le muscle se fatigue, la force qu'il développe décroît et même il peut cesser de pouvoir se contracter. Il intervient donc une question qui ne se présente pas dans les moteurs mécaniques bien construits : il se présenterait quelque chose d'analogue dans une machine à vapeur à condensation dans laquelle on ne remplacerait

pas ou on ne refroidirait pas l'eau du condenseur : le travail produit à chaque coup de piston diminuerait au fur et à mesure que la température de cette eau s'élèverait et pourrait même devenir nul pour une valeur déterminée de cette température.

L'étude des conditions de la fatigue des muscles présente un grand intérêt ; nous ne nous y arrêterons pas cependant, parce que dans le cas où l'homme ou les animaux agissent comme moteurs animés, cette fatigue n'apparaît qu'à la longue. Dans les mouvements effectués, ce sont des groupes différents de muscles qui agissent successivement et la bonne utilisation du moteur consiste précisément à ne pas faire fonctionner un muscle déterminé assez longtemps de suite pour qu'il se fatigue. C'est ce qui explique que deux hommes d'égale force sont dans des conditions très différentes, au point de vue de la fatigue, pour produire un certain effet si l'un est exercé à cet effet depuis un certain temps, alors que l'autre y est encore novice.

Mais, même dans les meilleures conditions, les muscles se fatiguent et il faut, après un certain temps, les laisser reposer pour pouvoir être mis en action de nouveau dans les conditions physiologiques normales. Il faut faire exception cependant pour le cœur et pour les muscles de la respiration dont l'action continue sans interruption de la naissance à la mort. Mais nous ne nous occupons pas actuellement de ceux-ci qui ne produisent pas de travail utilisable extérieurement.

Il résulte de cette remarque qu'un être animé ne peut produire de suite qu'une quantité déterminée de travail. Les conditions de l'existence étant déterminées par la présence ou l'absence du soleil sur l'horizon, puisque, ordinairement, toute action cesse pendant la nuit qui amène le sommeil, on est conduit à examiner la quantité de travail qui peut être fournie en un jour.

16. — La détermination de la quantité de travail produite par un homme ou par un cheval a été faite à diverses reprises ; cette quantité de travail représente l'effet utile, et l'on conçoit qu'elle ait un grand intérêt pratique, puisqu'elle intervient dans l'évaluation des prix.

Les nombres que nous allons indiquer ne représentent pas la quantité réelle de travail qui a été produite et lui sont certainement inférieurs. Quand, par exemple, on a évalué le travail pour l'élévation d'un fardeau, on n'a pas tenu compte du travail déployé par l'homme pour produire les mouvements de ses membres ; quand on a évalué ce travail dans le cas où l'homme s'élève seul ou avec une charge, on n'a pas tenu compte du travail nécessaire pour produire la marche, travail qui n'est pas négligeable et qui existe même pour un déplacement sur un plan horizontal, alors que, au point de vue mécanique, il n'y a pas de travail dépensé. Les quantités de travail réellement produites sont donc nécessairement supérieures aux nombres que nous allons donner.

Dans le tableau suivant, nous donnons des résultats fournis par divers auteurs et correspondant à une journée de huit heures ; nous indiquons en kilogrammètres le travail total produit, d'une part, et, d'autre part, le travail moyen effectué en une seconde (c'est-à-dire la puissance exprimée en centièmes de poncelet).

Indication du mode employé pour produire le travail.	Travail produit par journée de huit heures.	par seconde.	Noms des observateurs.
Homme élevant seulement le poids de son corps en montant une rampe ou un escalier..........	kgm 280 000	kgm 9,7	Navier.
Id.	205 000	9,0	Coulomb.
Idem. Sur une rampe de 0m,14 pour 1m........	184 000	6,4	Hachette.
Homme élevant une charge sur son dos (1)..................	56 000	1,9	Coulomb.
En élevant des poids sur une brouette (2)..................	35 000	1,2	Hachette.
En agissant sur une roue de carrière (3)....................	259 000	9,0	Navier.
Id. (4)	251 000	8,4	Navier.
L'homme poussant ou tirant horizontalement sur un cabestan....	207 000	7,2	Navier.
En tirant dans le halage (5)......	110 000	3,8	Hachette.
En agissant sur une manivelle (6).	173 000	6,0	Navier.
En tirant une corde pour élever le mouton d'une sonnette à tiraude.	72 000	2,5	Coulomb.
Cheval attelé à un manège.......	1 166 000	40,5	Navier.
Id.	1 123 000	38,9	Hachette.
Id.	1 118 000	38,3	D'Aubusson.
Id.	990 000	34,3	D'Aubusson.
Id.	842 000	29,2	Hachette.
Fort cheval au pas (5)...........	2 188 000	76,9	Watt.
Cheval au trot (5) en 4h 1/2......	972 000	60,0	Navier.

Nous pouvons encore citer les exemples suivants qui ne renseignent pas réellement sur le travail produit par l'homme, mais sur le travail utilisé qui, dans ce cas, n'est lié qu'indirectement avec le premier.

Pour effectuer des travaux de terrassement aux fortifications de Paris, le capitaine Coignet avait fait disposer à la partie supérieure une grande poulie sur laquelle passait une corde à chacune des extrémités de laquelle était un plateau : l'un des plateaux, reposant sur le sol, recevait une brouette chargée ; l'autre plateau était alors à la partie supérieure avec une brouette vide. Le mouvement du système et l'ascension de la brouette chargée étaient déterminés par le poids d'un homme qui se plaçait dans le plateau supérieur à côté de la brouette vide. L'homme, arrivé en bas, remontait par une échelle à la partie supérieure : c'était alors qu'il produisait du travail que nous pouvons évaluer. Nous savons seulement que dans une journée de huit heures, la brouette chargée d'un poids de 70 kilogrammes était élevée 310 fois à la hauteur de 13 mètres, ce qui représente 282 000 kilogrammètres. Le travail effectué par l'homme en montant était égal à celui produit par la

(1) Il ne s'agit ici que du travail utile. Il faudrait y ajouter le travail correspondant à l'élévation du poids de l'homme et à la production de ses mouvements.

(2) Même observation que dans la note précédente. Il est tenu compte du temps nécessaire pour revenir à vide.

(3) L'homme se tenant à la hauteur du centre de la roue.

(4) L'homme se tenant à la hauteur du centre de la roue.

(5) Il faudrait tenir compte ici du travail correspondant au déplacement horizontal de l'homme.

(6) Le travail a été évalué en mesurant au dynamomètre la force appliquée au trait.

pesanteur lors de la descente. Mais celui-ci était supérieur au travail recueilli à cause des frottements, de la raideur des cordes, etc. Nous pouvons donc dire seulement que dans une journée de huit heures l'homme produisait certainement plus de 282 000 kilogrammètres, soit plus de $9^{kgm},8$ par seconde : ce sont les valeurs maxima qui, à notre connaissance, aient été signalées pour un travail continu.

Un procédé analogue fut employé lors de la construction du chemin de fer de Birmingham. La moyenne des résultats observés pendant une année donna 125 000 kilogrammètres par journée de 10 heures, soit seulement $3^{kgm},9$ par seconde.

En résumé, en laissant de côté des valeurs sur lesquelles nous avons fait des observations, on voit que l'homme peut fournir par jour un travail utilisable variant entre 173 000 et 282 000 kilogrammètres, ce qui correspond à un travail moyen par seconde compris entre 6 et $9^{kgm},8$. Comme nous l'avons dit, le travail produit est certainement supérieur à ces valeurs.

17. — Nous avons dit que pour marcher sur un terrain horizontal, ce qui ne correspond à aucun travail mécanique dépensé, l'homme doit cependant produire du travail. Cherchons, s'il est possible, à évaluer ce travail.

Coulomb a étudié cette question et il a désigné sous le nom d'*effet utile* (désignation impropre) le produit du chemin parcouru en terrain horizontal par le poids transporté.

Il a reconnu qu'un homme du poids de 70 kilogrammes, portant une charge de 58 kilogrammes à une distance de 2000 mètres et revenant à vide peut répéter cette manœuvre six fois dans la journée. L'effet utile est donc pour un double voyage :

$$(70 + 58)\,2000 + 70 \times 2000 = 398\,000.$$

et pour les six trajets :

$$398\,000 \times 6 = 2\,388\,000.$$

Dans une autre observation, Coulomb indique qu'un homme de 70 kilogrammes, portant une charge de 44 kilogrammes, peut faire 19 kilomètres par jour. L'effet utile est alors

$$(70 + 44)\,19\,000 = 2\,166\,000$$

ombre concordant avec le précédent.

D'autre part, Haughton a observé qu'un homme du poids de $72^{kg},5$ non chargé, peut faire par jour 20 milles, soit $32^{km},180$. L'effet utile est alors

$$72,5 \times 32\,180 = 2\,333\,050.$$

valeur qui se rapproche beaucoup des précédentes.

Si nous admettons que l'homme, dans ce cas, produit un travail égal à celui qui résulte des observations données précédemment, nous pourrons évaluer le travail correspondant au déplacement horizontal d'un poids de

1 kilogramme sur une longueur de 1 mètre. Soit en effet t ce travail, soient P le poids et D la distance horizontale parcourue, le travail total sera $t \times P \times D$ dans lequel $P \times D$ représente précisément l'effet utile de Coulomb, et nous devrons égaler cette quantité au travail donné d'autre part par les observations directes.

La moyenne des valeurs données ci-dessus pour l'effet utile de Coulomb est 2 292 000.

Nous ne connaissons pas, d'après les observations que nous avons rapportées, quelle est la quantité de travail que peut, normalement, produire un homme en un jour. Mais nous devons admettre qu'elle est au moins égale à la quantité maxima du travail utilisable qui a été signalée, les autres valeurs, plus faibles, devant correspondre à une moins bonne utilisation des forces. Nous prendrons donc le nombre de 282 000 kilogrammètres comme représentant le travail produit.

Nous aurons donc, pour déterminer t, la relation

$$2\,292\,000\,t = 282\,000.$$

d'où l'on déduit

$$t = 0^{\text{kgm}},123.$$

S'il s'agit d'un homme du poids de 75 kilogrammes, faisant des pas de $0^{\text{m}},80$, le travail nécessaire pour le déplacement représenté par un pas sera

$$t \times 75 \times 0,80 = 0,123 \times 75 \times 0,80 = 7^{\text{kgm}},4.$$

Mais, comme nous l'avons dit, cette valeur est certainement trop faible, car même dans le cas le plus favorable, le travail produit est supérieur au travail utilisé.

On a cherché à traiter directement la question, en étudiant les conditions de la marche.

On sait que pendant un pas le centre de gravité s'élève, ce qui exige une dépense de travail, il est vrai; mais au début du pas suivant, il est revenu dans le plan horizontal où il était au début et il a repris la même vitesse. Théoriquement, il devrait y avoir compensation exacte et la dépense de travail pour un pas devrait être nulle.

En réalité, la compensation ne se fait pas : le centre de gravité arrive sans vitesse à la fin du pas, ainsi qu'il résulte des observations de Marey : il faut donc qu'il y ait production d'une force s'opposant à l'action de la pesanteur et exécutant pour cela un certain travail. Marey admet qu'il est le même que celui qui a été nécessaire pour élever le centre de gravité. Cette élévation est en moyenne de $0^{\text{m}},04$; pour un homme du poids de 75 kilogrammes, le travail nécessaire à l'ascension du corps est donc de 3 kilogrammètres; il serait aussi, dès lors, de 3 kilogrammètres à la descente.

La vitesse du centre de gravité, en déplacement horizontal, ne reste pas constante : il est vrai que, après chaque pas, elle reprend la même valeur et que, la variation de la force vive étant nulle, il n'y a pas de travail dépensé

au sens mécanique. Mais ce résultat tient à ce que si, dans le premier demi-pas, il y a une force qui produit l'accélération, il y a dans le second demi-pas une force égale et contraire qui produit le ralentissement; mais, pour l'organisme, la dépense, l'usure, la fatigue sont les mêmes, quel que soit le sens dans lequel agit la force produite. M. Marey conclut de là que le travail correspondant au déplacement horizontal du centre de gravité pendant un pas est le double de celui qui est nécessaire pour le premier demi-pas, dans lequel la vitesse s'accroît. Il a évalué les variations de vitesse d'après les images chronophotographiques de la marche, et il a pu évaluer à $2^{kgm},5$ le travail correspondant à un pas.

Enfin, dans la marche, et pour des raisons analogues, il y a lieu de tenir compte du travail dépensé par le déplacement du membre inférieur : à l'aide de la chronophotographie, il a été trouvé égal à $0^{kgm},3$.

La somme des valeurs ainsi déterminées donne le travail correspondant au déplacement horizontal pour un pas ou plutôt donne une valeur trop grande, car il semble que l'on fait une évaluation trop large en admettant que le travail dépensé dans la seconde moitié du pas, qui correspond à la décroissance des vitesses, soit égal au travail dépensé dans la première moitié.

En admettant les évaluations données par M. Marey, on trouve pour le travail dépensé en un pas

$$3 + 3 + 2,5 + 0,3 = 8^{kgm},8.$$

Cette valeur est probablement trop forte; par un autre mode d'évaluation, nous avons trouvé $7^{kgm},4$, qui est vraisemblablement trop faible. On peut donc prendre le chiffre de 8 kilogrammètres comme représentant sensiblement le travail dépensé par un homme du poids de 75 kilogrammes pour un pas de $0^{m},80$ sur un terrain horizontal.

La question est moins simple, en réalité, que nous ne l'avons supposée : il intervient en effet un autre élément qui, quoique ne figurant pas au point de vue mécanique, joue un rôle dans le cas des moteurs animés : c'est celui du temps pendant lequel se produit le déplacement considéré, c'est celui de la vitesse.

Nous avons indiqué déjà que le travail moyen produit par seconde était de $76^{kgm},9$ pour un cheval au pas, d'après Watt, et seulement de 60 kilogrammètres pour un cheval au trot, d'après Marey : il faut dire que la comparaison ne peut être faite avec précision, car nous n'avons pas d'indications sur la nature et la taille des chevaux auxquels se rapportent ces expériences.

Mais les recherches directes de Marey ont montré d'une manière incontestable pour l'homme l'influence de la vitesse : c'est ainsi que, tandis que pour la marche il trouvait $8^{kgm},8$ pour le travail correspondant à un pas, il évaluait ce même travail à $24^{kgm},1$ pour la course.

En opérant à des vitesses variables, M. Marey a pu tracer des courbes représentant la dépense par pas en fonction de la cadence, c'est-à-dire du nombre de pas à la minute. Pour la marche, la dépense croît avec la cadence; l'augmentation est rapide d'abord entre 40 et 55 pas à la minute, elle est très

lente entre 55 et 75, pour redevenir rapide au delà de 75 jusqu'à 90 pas par minute.

Pour la course, le travail décroît de 90 à 105 pas par minute pour croître rapidement ensuite de 105 à 145 pas.

Sans nous arrêter aux valeurs absolues qui s'appliquent évidemment à un sujet déterminé, on peut cependant déduire des conclusions générales. C'est ainsi que l'on voit que pour franchir un espace déterminé en marchant, on dépense d'autant moins de travail qu'on va plus lentement. Il n'en est plus de même pour la course, où le travail dépensé passe par un minimum pour une certaine cadence qui n'est pas la plus lente.

La question se présenterait autrement si on étudiait la quantité de travail dépensé, non plus pour un espace déterminé, mais pour un temps donné.

L'examen des courbes fournies par M. Marey montre que le travail dépensé par pas pour une marche à la cadence de 90 pas par minute est plus grand que celui qui aurait correspondu à la course, à la même cadence. Lors donc qu'on se trouve sur les limites de la course et de la marche, il y a intérêt à courir, et cela, soit au point de vue de l'espace parcouru, soit au point de vue du temps, puisque l'un et l'autre sont les mêmes dans les deux cas.

18. — Dans le tableau que nous avons donné plus haut, nous avons indiqué le travail moyen effectué par seconde dans les différents cas, c'est-à-dire la puissance moyenne.

Mais cela ne renseigne pas sur la puissance vraie de l'homme considéré comme moteur, car pendant les huit heures de travail, il y a toujours du temps de repos plus ou moins complet, où la puissance est nulle ou très diminuée, inférieure à la moyenne, de telle sorte que nécessairement elle doit être supérieure à la moyenne pendant les moments d'action.

Une observation intéressante, rapportée par Haughton, permet d'obtenir une valeur de la puissance vraie dans un cas déterminé. Dans une course, une barque à huit rameurs parcourut l'espace de 1 mille (1 828 mètres) en sept minutes. En s'appuyant sur des formules relatives à la propulsion des bateaux données par Rankine, on a pu calculer le travail nécessaire pour parcourir cette distance à la vitesse observée (il faut tenir compte de la vitesse, car les résistances croissent avec celle-ci). On a trouvé que le travail produit par homme et par minute était de 1 240 kilogrammètres : mais des corrections indiquées par Scott Russel l'abaissèrent à 1 133 kilogrammètres.

Ces chiffres sont certainement très voisins de la réalité ; car Maclaren, par des expériences directes, où il mesurait à l'aide d'un dynamomètre la force produite, trouva une valeur à peu près égale : 1 114 kilogrammètres.

Nous pouvons prendre le nombre 1 120 ; on voit que le travail par seconde est de $18^{kgm},7$, c'est-à-dire que la puissance est de 0,187 poncelet. Pour se rapporter à une valeur connue, on voit que, le cheval vapeur étant de 0,75 poncelet, chaque rameur a développé une puissance de 1/4 de cheval vapeur.

Il est probable que cette puissance ne peut être notablement dépassée, car les rameurs dans les courses sont généralement bien entraînés, c'est-à-dire qu'ils utilisent au mieux les efforts qu'ils produisent. Ajoutons encore

que cette valeur ne doit pas être étendue d'une manière générale, car la vitesse maintenue pendant sept minutes n'aurait pas pu être conservée beaucoup plus longtemps.

En réalité, le travail produit et, par suite, la puissance doivent avoir des valeurs supérieures à celles que nous venons d'indiquer, puisque, dans cet exemple encore, on n'a tenu compte que du travail utilisé et que, pour connaître le travail produit, il faudrait lui ajouter le travail correspondant aux mouvements exécutés par le corps et les membres du rameur.

19. — Nous n'avons pas à nous occuper ici de déterminer les sources d'énergie qui existent chez l'homme : nous admettrons comme démontré, par ce qui a été dit d'autre part, que l'énergie est fournie par les actions chimiques qui se passent dans l'organisme.

On sait aussi que tout ou partie de l'énergie produite est utilisée pour produire de la chaleur et, par exemple chez les animaux supérieurs, maintenir une température constante malgré les causes de refroidissement auxquelles ils sont soumis.

La possibilité de transformation des différentes formes d'énergie conduit à supposer que le travail mécanique que peuvent produire les êtres vivants a également comme origine les mêmes actions chimiques : on ne voit pas d'ailleurs quelle pourrait être, en dehors de ces actions, la cause continue d'une production d'énergie. D'ailleurs, on sait que lorsqu'un homme ou un animal travaille, les actions chimiques qui se produisent dans l'intimité des tissus augmentent : il est vrai que la quantité de chaleur s'accroît également ; mais des expériences variées ont montré que cet accroissement ne suffirait pas à utiliser l'augmentation d'énergie due aux actions chimiques.

On sait, d'une part, que les actions chimiques en général, les combustions, dégagent de la chaleur : nous avons rappelé d'autre part qu'il est démontré que la chaleur peut se transformer en travail mécanique. Aussi, a-t-on pensé qu'une double transformation de ce genre se produisait dans l'organisme d'un être vivant qui travaille : chez celui-ci, on sait qu'il y a augmentation des actions chimiques, par rapport à ce que celles-ci sont à l'état de repos ; on en concluait qu'il y a augmentation de la quantité de chaleur produite : une partie de celle-ci subsiste à cet état, mais l'autre partie se transforme en travail mécanique.

Des expériences variées ont été faites dans le but de prouver la réalité de cette double transformation : il nous paraît inutile de les signaler et de les discuter, parce que cette double transformation ne peut avoir lieu, comme nous allons le montrer.

Horn, dans des expériences intéressantes, a déterminé la quantité d'oxygène absorbée en 1 heure par un homme au repos ; il l'a trouvée égale à 30 grammes. Il a répété la même mesure alors que cet homme produisait du travail mécanique en agissant sur une roue à cheville, analogue à la roue des carriers, et il a trouvé que la quantité d'oxygène absorbée était de 132 grammes, ce qui constitue un excès de 102 grammes. Il a mesuré d'autre part le travail produit dans le même temps et il a été trouvé égal à 33 000 kilogrammètres.

On ne peut déterminer exactement la quantité de chaleur qui aurait été

dégagée par suite de l'augmentation des actions chimiques, car on ne sait pas quels matériaux ont été comburés. A la suite d'une discussion basée, il faut le reconnaître, sur des données hypothétiques, Gavarret a conclu que l'absorption de 1 gramme d'oxygène utilisé à des combustions devait correspondre à 3,22 calories. Prenons seulement 3 calories. L'excès de 102 grammes d'oxygène employé pendant le travail aurait donc produit 306 calories.

Nous pouvons déterminer la quantité de chaleur qui aurait dû être transformée pour produire les 33 000 kilogrammètres qui ont été recueillis, puisque nous savons que la transformation se produit à raison de 425 kilogrammètres pour 1 calorie. Cette quantité de chaleur est

$$33000 : 425 = 77^{\text{cal}},5.$$

Le rapport entre la quantité de chaleur produite et la quantité de chaleur utilisée, le rendement, est égal à 77,5 : 306, soit sensiblement 0,25. Il est vrai que, en réalité, il faudrait tenir compte, non seulement du travail utilisé, 33 000 kilogrammètres, mais aussi du travail nécessaire pour produire les divers mouvements de l'homme, ce qui aurait pour effet d'augmenter la valeur du rendement.

Par divers procédés, d'autres auteurs ont cherché à déterminer le rendement dans le cas où un homme produit du travail mécanique. Helmholtz a trouvé 0,20 : Fick, 0,33 à 0,20 ; Heidenhain, 0,50. Les valeurs extrêmes sont donc 0,20 et 0,50.

Or, le théorème connu en thermodynamique sous le nom de théorème de Carnot apprend que, lorsque la chaleur se transforme en travail mécanique en passant d'un corps chaud à un corps froid, il y a une relation entre les températures de ces corps et le rendement.

Soient R la valeur du rendement, t_1 et t_2 les températures des deux corps, on a

$$\frac{t_1 - t_2}{t_1 + 273} = \mathrm{R}$$

$$t_2 = (1 - \mathrm{R})\, t_1 - 273 \times \mathrm{R}.$$

Puisque le travail produit dans l'organisme provient de la transformation d'une certaine quantité de chaleur, il faudrait qu'il s'y trouvât des points où les températures eussent des valeurs t_1 t_2 satisfaisant à la condition précédente.

L'une de ces températures doit être la température normale de 37°,5 ; mais celle-ci peut être aussi bien t_1 ou t_2 ; examinons donc successivement ces deux hypothèses.

On aurait $t_1 = 37°,5$. En effectuant le calcul successivement pour les valeurs extrêmes qui ont été données pour le rendement, on trouve :

Pour $\mathrm{R} = 0,5$ $\quad t_2 = -117°,5$
$\mathrm{R} = 0,2$ $\quad t_2 = -\ 24°,6,$

Si, au contraire, on avait $t_2 = 37°,5$, le calcul donne :

$$\text{Pour } R = 0,5 \qquad t_1 = 348°$$
$$R = 0,2 \qquad t_1 = 115°.$$

Or, aucune des valeurs ainsi trouvées, $-117°,5$; $-24°,6$; $-115°$, ni $348°$ ne peut exister en aucun point de l'organisme. Il n'y a donc pas les conditions qui permettraient la transformation de la chaleur en travail avec les rendements qui ont été évalués. Cette transformation n'a donc pas lieu et ce n'est pas par cette voie qu'est produit le travail que les êtres vivants fournissent, ce n'est pas par l'intermédiaire de la chaleur que les actions chimiques donnent naissance à de l'énergie apparaissant sous forme mécanique.

Mais il n'est pas nécessaire d'introduire cet intermédiaire : rien ne prouve que les actions chimiques ne puissent donner directement du travail mécanique. On peut même penser qu'il en est ainsi, par exemple, dans le cas des explosifs. Pourquoi n'en serait-il pas de même dans l'organisme : une partie de l'énergie chimique subissant directement la transformation en énergie mécanique, produit le travail recueilli extérieurement et le travail nécessaire à la mise en mouvement du corps et des membres. Une autre partie se transformerait en chaleur qui apparaîtrait sous cette forme, correspondant à l'excès de production de chaleur qui est observé toutes les fois qu'un être vivant produit un travail mécanique. Comme le dit M. Chauveau, cet excès de chaleur observé serait un résidu.

Il se produirait ainsi dans l'organisme quelque chose d'analogue à ce que l'on observe dans un système formé par une pile et une dynamo. Il se produit dans la pile des actions chimiques qui, par l'intermédiaire du courant, fournissent, d'une part, du travail que l'on recueille sur l'arbre de la dynamo, et d'autre part de la chaleur qui apparaît dans tous les conducteurs. Nous ne voulons donc pas dire qu'il en est ainsi dans l'organisme ; mais cet exemple montre que la chaleur n'est pas nécessairement un intermédiaire entre les actions chimiques et le travail. Peut-être, dans l'organisme, la transformation se fait-elle effectivement par l'intermédiaire de l'électricité sous une forme quelconque ; peut-être se fait-elle par une autre voie ; mais ce que l'on peut affirmer, c'est qu'elle n'a pas lieu par l'intermédiaire de la chaleur.

PROPAGATION DE LA CHALEUR

PROTECTION DES ANIMAUX

Par M. GARIEL

---

1. — Si l'on vient à toucher un vase rempli d'eau bouillante, on éprouve une sensation de chaleur; si, au contact de ce vase, on met le réservoir d'un thermomètre, on note une élévation de température; si on approche, également au contact, un morceau de glace, un fragment de cire à modeler, on observe la fusion de ces corps. On explique ces effets, et d'autres du même genre, en admettant qu'un agent particulier, que nous appellerons *chaleur*, passe de l'eau bouillante aux corps qui sont en contact avec le vase.

On reconnaît que les mêmes effets se produisent, quoique plus faiblement, alors que le thermomètre, que nous considérerons seulement pour simplifier, n'est pas au contact du vase rempli d'eau bouillante. Tout se passe donc comme si de la chaleur quittait celui-ci pour aller à distance agir sur le thermomètre. C'est ce que l'on exprime en disant que la chaleur se propage.

Il est commode de se représenter d'une manière quasi matérielle la nature des phénomènes que l'on étudie. Par des raisons diverses, que ce n'est pas ici le lieu d'étudier, on a été conduit à penser que les phénomènes calorifiques sont liés au mouvement vibratoire des molécules, à la force vive dont celles-ci sont animées. L'état calorifique d'un corps, sa température, dépendrait des conditions du mouvement vibratoire des molécules matérielles qui le constituent.

La question de la propagation de la chaleur est alors ramenée à celle de la propagation d'un mouvement vibratoire.

Lorsque, entre la source de chaleur et le thermomètre, il existe une série continue de milieux matériels, on conçoit aisément que ce mouvement vibratoire se transmette de proche en proche, comme se transmettent certainement dans l'air les vibrations qui donnent naissance aux phénomènes sonores.

Mais une expérience classique, celle du ballon de Rumfort, montre que la chaleur se propage même à travers le vide. Le mode de transmission que nous venons d'indiquer ne peut expliquer cette expérience.

Nous savons que l'étude des phénomènes lumineux a conduit à admettre que l'espace, en plus des molécules matérielles, contient des molécules

d'éther, fluide impondérable, ou mieux impondéré. C'est par leur intermédiaire que se transmettrait la chaleur dans le vide : les molécules matérielles des corps chauds mettraient en vibration les molécules d'éther avec lesquelles elles sont en contact, et qui se transmettraient de proche en proche le mouvement vibratoire jusqu'au contact du thermomètre dont les molécules recevraient à leur tour la force vive ainsi transmise, action qui se manifesterait par une élévation de température.

Ce mode de propagation de la chaleur constitue la propagation par *radiation* : les phénomènes qui se passent dans le vide sont entièrement analogues à ceux de la propagation des radiations lumineuses, et la vitesse serait la même dans les deux cas, ou tout au moins du même ordre de grandeur, c'est-à-dire très considérable. Aussi le thermomètre dans le vide, mis brusquement en présence d'un corps, indique-t-il immédiatement une élévation de température : le liquide dans la tige commence immédiatement à s'élever pour atteindre son niveau définitif après un certain temps.

2. — Si l'on considère une barre métallique de quelque longueur dont on place une extrémité dans de l'eau bouillante, et dont on mesure la température à l'autre extrémité, on note, comme dans le cas précédent, que cette température s'élève jusqu'à atteindre une valeur déterminée par les conditions de l'expérience. Mais les phénomènes sont différents : d'une part, il faut un temps fini, appréciable pour que l'élévation de température commence à se manifester; et, d'autre part, si on détermine la loi qui lie cette élévation de température à la distance, on reconnaît qu'elle n'est pas la même dans les deux cas.

On ne saurait donc expliquer la propagation de la chaleur de la même façon. Dans ce dernier cas, on admet que le mouvement vibratoire se communique de proche en proche par les molécules matérielles : c'est la propagation *par conduction*.

Il y a toujours propagation par conduction lorsqu'il existe une série ininterrompue de milieux matériels entre la source de chaleur et le thermomètre ; mais il peut y avoir, en même temps, propagation par radiation, c'est-à-dire que le mouvement vibratoire des molécules de la source de chaleur sont transmises au thermomètre à la fois par les molécules matérielles du milieu et par les molécules d'éther. Il peut même arriver que, malgré la présence du corps matériel, la propagation par conduction ne produise pas d'effet appréciable et que la propagation efficace soit celle par radiation.

Ce dernier cas est très souvent celui qui se manifeste pour la propagation dans l'air. On peut en être averti, par exemple, par la rapidité, l'instantanéité de l'action que des expériences aisées à concevoir mettent en évidence, puis également par le fait que la température des points intermédiaires peut n'être que peu ou pas modifiée, tandis que, dans le cas de la conduction, ces points devraient avoir des températures décroissantes depuis la source jusqu'au thermomètre.

Dans des expériences plusieurs fois répétées, on a concentré les rayons du soleil au foyer de grandes lentilles de glace (eau congelée), et on y a obtenu des effets calorifiques considérables : là encore, la propagation se

faisait surtout par radiation, car sans cela la glace fût entrée en fusion avant que la température pût s'élever au delà de 0 degré.

3. — Enfin, dans des circonstances spéciales, lorsque la source de chaleur est au sein d'un fluide, la propagation peut se faire encore d'une autre façon : au contact de la source, le fluide s'échauffe et, par suite, devient plus léger (sauf quelques cas exceptionnels, comme nous le dirons) ; en vertu du principe d'Archimède, ces portions chaudes s'élèvent verticalement pour être remplacées par d'autres qui s'échauffent et s'élèvent à leur tour. Il se produit donc autour et au-dessus de la source de chaleur un courant de fluide chaud ; si donc un thermomètre est placé dans ce courant, il indiquera une élévation de température. La chaleur ne se transmet pas dans ce cas ; elle est transportée par les molécules du fluide ; c'est ce que l'on appelle la propagation *par convection*.

Bien entendu, la propagation par radiation se manifeste en même temps qu'il y a convection. Mais cette dernière action est souvent de beaucoup supérieure ; c'est ce qui explique, par exemple, qu'on peut approcher la main d'une flamme latéralement sans inconvénient, tandis que, au-dessus, à la même distance, on éprouve une sensation désagréable qui peut aller jusqu'à la brûlure : les gaz chauds issus de la flamme transportent beaucoup de chaleur par convection.

Avant de revenir aux modes de propagation par conduction et par radiation, arrêtons-nous à signaler quelques conséquences de la convection.

Le phénomène de la convection explique que dans une salle où il existe une source de chaleur, la température soit plus élevée à la partie supérieure ; c'est le cas, par exemple, de toute salle où des hommes se trouvent réunis, alors même qu'il n'y a pas de source artificielle de chaleur, puisque l'homme dégage normalement de la chaleur : l'action, naturellement, est plus grande s'il y a des lumières qui soient produites par la combustion.

Les variations dues à cette action peuvent être très considérables ; c'est ainsi que dans une salle de Birmingham qui contenait, il est vrai, 3 100 personnes, en trois heures la température au plafond s'est élevée de 13°,5 à 37°. Il est inutile d'insister sur les effets très fâcheux qui peuvent résulter d'une variation semblable si, comme cela arrive dans les salles de théâtre, il existe à la partie supérieure des galeries remplies de spectateurs.

Comme il est facile de le prévoir, l'élévation de température est d'autant plus grande que l'on considère des points plus rapprochés du plafond.

C'est ainsi que, au théâtre de Munich, éclairé au gaz, M. Pettenkofer a observé, après une heure, les variations suivantes de température :

Orchestre..............	de 15°,2	à 16°,5	soit 1°,3
1re galerie..............	16°,2	19°,4	9°,2
2e galerie..............	16°,2	25°,4	9°,2

Le phénomène de la convection est utilisé dans le tirage des cheminées, dans la ventilation par cheminée d'appel ; mais la propagation de la chaleur n'étant alors qu'un phénomène accessoire, nous n'avons pas à nous y arrêter.

Il y a convection également dans le cas inverse où un corps froid est placé dans un fluide ; il se produit alors un courant descendant de fluide refroidi qui abaisse la température des points situés au-dessous. Cette remarque explique ce qu'on observe en hiver lorsque, dans une pièce chaude, on s'approche d'une baie vitrée : on éprouve une sensation désagréable de refroidissement général. C'est que le vitrage, refroidi sur une de ses faces par son contact avec l'air extérieur, provoque, sur son autre face refroidie par conduction, la descente d'une nappe d'air froid qui se refroidit de plus en plus par son contact continu avec le vitrage. Cela explique la disposition fréquemment employée maintenant pour combattre cet inconvénient et qui consiste à placer, au pied de chaque baie, une batterie de tuyaux traversés par de l'eau chaude ou par de la vapeur et qui, par convection, produisent une nappe ascendante d'air chaud qui, non seulement détruit l'effet de la nappe froide, mais qui fait même presque disparaître celle-ci en échauffant le vitrage et détruisant la cause de la nappe descendante.

Les phénomènes de convection étant dus aux variations de densité, peuvent se produire en sens contraire de ce que nous avons indiqué, si les variations de densité du fluide avec la température ne suivent pas la règle générale, comme c'est le cas, par exemple, pour l'eau entre 0° et 4° ; on sait, en effet, que, entre ces températures, la densité de l'eau croît quand la température s'élève.

Si donc une masse d'eau déjà refroidie à 4° est en contact à sa partie inférieure avec un corps à une température moindre, l'eau froide montera à la partie supérieure et pourra arriver jusqu'à 0°, tandis que l'eau à 4° restera à la partie inférieure, la répartition des températures étant ainsi en sens inverse de ce qu'elle serait pour un autre liquide ou pour l'eau au-dessus de 4°, puisque dans ce cas, lorsque l'équilibre existe, la température est d'autant plus basse qu'on considère des points plus profondément situés.

On sait que c'est par une expérience basée sur cette remarque qu'on peut mettre aisément en évidence l'existence du maximum de densité de l'eau.

4. — La propagation par radiation dans le vide, intéressante au point de vue théorique, ne présente pas d'applications pratiques. Nous dirons seulement que la quantité de chaleur reçue par un élément de surface dans l'unité de temps varie en raison inverse du carré de la distance de cet élément à la source de chaleur.

Lorsque la propagation par radiation se fait à travers un corps matériel, la question est moins simple, car, en réalité, le mouvement vibratoire se transmet partiellement aux molécules matérielles de telle sorte que la diminution de force vive est plus grande que celle qui résulterait de la loi que nous venons d'énoncer : un élément de surface reçoit moins de chaleur dans l'unité de temps que ne l'indiquerait cette loi. Il y a *absorption* de chaleur par le milieu traversé.

Cette absorption croît naturellement avec l'épaisseur du milieu ; elle dépend aussi de la nature de celui-ci. Pour certains corps qui sont appelés *diathermanes*, l'absorption est faible ; pour d'autres, au contraire, même pour une petite épaisseur, l'absorption est considérable et telle qu'il ne passe

qu'une quantité de chaleur à peine appréciable et négligeable dans la pratique ; ces corps sont dits *athermanes*.

Il est très important de remarquer que les vibrations qui produisent des effets calorifiques ne sont pas toutes identiques : elles diffèrent entre elles comme diffèrent les radiations lumineuses, et chacune est caractérisée par son indice de réfraction à travers un corps déterminé. La diathermansie et l'athermansie sont analogues à la transparence et à l'opacité de la lumière ; comme celles-ci, pour un milieu donné, elles dépendent de la réfrangibilité de la radiation considérée.

L'air sec est à peu près également diathermane, transparent, pour toutes les radiations, et il ne produit que peu d'absorption. Aussi, lorsqu'il ne s'agit que de faibles épaisseurs, peut-on la négliger en général et admettre que les variations d'intensité sont en raison inverse du carré de la distance. Mais il n'en est plus ainsi lorsqu'il s'agit de grandes épaisseurs pour lesquelles l'absorption peut être considérable, comme il arrive lorsque, par exemple, on considère l'action de l'atmosphère terrestre sur les rayons solaires qui y parviennent. Nous ne croyons pas devoir insister sur les recherches qui ont été faites à ce sujet.

Quoique l'action absorbante d'un corps puisse se manifester d'une manière spéciale sur chaque espèce de radiation, il est des corps dont l'action est sensiblement la même pour un groupe étendu de radiations, tandis qu'elle peut être très différente pour un autre groupe.

C'est ainsi que la vapeur d'eau et le verre sont presque opaques, athermanes, pour les radiations peu réfrangibles, celles qui correspondent à la partie infra-rouge du spectre, à la chaleur obscure, comme on disait autrefois, tandis qu'ils sont transparents pour les radiations de réfrangibilité moyenne, celles qui correspondent à la partie lumineuse du spectre, pour la chaleur lumineuse. Pour d'autres corps, on observe des conditions inverses : c'est le cas d'une solution concentrée d'iode dans le sulfure de carbone qui est opaque à la chaleur lumineuse et transparente à la chaleur obscure.

Tyndall s'est servi de cette dernière propriété dans les intéressantes expériences qu'il a faites sur la chaleur obscure.

La propriété de la vapeur d'eau qui se manifeste dans le cas de l'air humide explique divers phénomènes signalés en météorologie, et notamment le refroidissement considérable qui se produit dans les nuits claires, tandis qu'il est beaucoup moindre dans les nuits où le ciel est couvert. Pendant la journée, le sol a été échauffé par les rayons du soleil qui ont traversé l'atmosphère ; l'échauffement a été moindre par les temps couverts, puisque si la chaleur lumineuse a passé, la vapeur d'eau a arrêté la chaleur obscure. Mais pendant la nuit, la terre ainsi échauffée rayonne vers les espaces célestes, mais elle rayonne seulement de la chaleur obscure ; celle-ci ne peut traverser l'air humide et reste dans le sol ou dans les couches d'air voisines, tandis que si le ciel est clair, l'atmosphère sèche, la chaleur obscure traversera celle-ci presque sans obstacle, ce qui refroidira considérablement le sol.

C'est d'une façon analogue qu'agit le verre dans les vitrages en général,

les serres, les châssis, les cloches à melon, etc. Les radiations venant du soleil, ou du moins la chaleur lumineuse qu'elles contiennent, traversent le verre et échauffent les corps placés de l'autre côté du verre. Mais ces corps échauffés n'émettent que de la chaleur obscure pour laquelle le verre est opaque; cette chaleur ne peut donc sortir de l'espace limité par le verre et la température de cet espace reste élevée, alors même que, sur l'autre face du verre, l'air est à une température notablement inférieure : le refroidissement ne peut se faire que par conduction, mais, comme nous le dirons, il est faible dans ce cas.

L'effet du verre est ainsi d emprisonner pour ainsi dire la chaleur solaire; aussi M. Mouchot a-t-il eu l'idée d'appliquer cette propriété à produire de notables élévations de température, à amener, par exemple, de l'eau à l'ébullition. M. A. Piffre a construit sur ce principe une *chaudière solaire* dont les résultats n'ont pas été aussi satisfaisants qu'on l'espérait au point de vue pratique, à cause des grandes dimensions que ces appareils doivent présenter pour produire des effets utilisables.

5. — Occupons-nous maintenant de la propagation par conduction, et considérons d'abord le cas d'un corps solide dans lequel il ne peut pas se produire de phénomènes de convection.

Soit un corps dont tous les points soient à la même température, et soient deux points A et B séparés par un certain intervalle. Mettons A en contact avec une source de chaleur dont la température soit maintenue constante, et notons la température de B. L'expérience montre qu'elle commence à croître après un certain temps qui dépend, pour le corps considéré, de la distance AB; la température de B croît ensuite continûment; puis, à partir d'un certain instant, elle devient constante. Il y a donc deux périodes à considérre dans le phénomène: dans la première, qui est appelée l'*état variable*, la température d'un point dépend à la fois de la position du point et de l'instant où se fait l'observation; dans la seconde période, qui constitue l'*état permanent*, la température est indépendante du temps et ne dépend que de la position du point.

Nous ne nous occuperons que de l'état permanent.

Considérons une lame à faces parallèles d'assez grandes dimensions d'un corps homogène et supposons que nous maintenions chaque face à une température invariable : soient t_1 et t_2 ces températures. Dans ces conditions, de la chaleur passera de la face la plus chaude à la face moins chaude, de t_1 à t_2 par exemple. Lorsque l'état permanent sera établi, l'invariabilité des températures exige évidemment que la quantité de chaleur qui passe pendant l'unité de temps à travers une surface égale à l'unité soit constante.

On démontre que si on appelle Q cette quantité constante de chaleur, d la distance qui sépare les deux faces, et k une constante qui dépend de la nature du corps, on a la relation :

$$Q = k \frac{t_1 - t_2}{d}.$$

Ce cœfficient k est appelé *coefficient de conductibilité* de la substance considérée.

Si on fait $t_1 - t_2 = 1$ degré, et $d = 1$ centimètre, on voit que l'on a $Q = k$. On peut donc dire :

Le coefficient de conductibilité d'un corps est numériquement égal à la quantité de chaleur qui, en une seconde, traverse une section de 1 centimètre carré d'une lame à faces parallèles dont les deux faces, distantes de 1 centimètre, sont maintenues à des températures différant de 1 degré.

On ne peut, dans la pratique, réaliser les conditions qui permettraient de vérifier les résultats de la théorie, et, en particulier, de déterminer la valeur du coefficient de conductibilité. Une des difficultés consiste à connaître les températures t_1 et t_2 ; pour maintenir des faces à des températures invariables, on les met en contact avec des fluides, gaz ou liquides, portés à des températures connues et soumis à une agitation qui assure l'uniformité de température ; mais une face en contact avec un fluide ne prend pas sa température, et, quand l'état permanent est établi, il subsiste une différence invariable entre la température du fluide et celle de la face. Il passe donc une quantité de chaleur constante par unité de surface dans l'unité de temps ; par analogie on la désigne sous le nom de *coefficient de conductibilité extérieure*.

Considérons maintenant une barre prismatique ou cylindrique, de section constante, placée dans un milieu de température invariable ; portons les deux extrémités, A et B, respectivement à des températures également invariables t_1 et t_2, t_1 étant par exemple supérieur à t_2. Dans ces conditions, quand l'état permanent sera établi, de la chaleur passera d'une manière continue et uniforme de A en B ; mais toute la chaleur envoyée par A ne parviendra pas en B, car une partie sera communiquée au milieu ambiant par la périphérie de la tige. Il résulte de là une certaine répartition des températures, qui est déterminée par une loi que la théorie a permis d'énoncer. Des expériences ont montré que les résultats observés vérifient cette loi ; en se plaçant dans des conditions convenables, on a même pu déterminer les rapports de coefficients de conductibilité de diverses substances.

On a réalisé des expériences analogues sur les liquides et, à la condition d'éviter les effets de convection, on a obtenu des résultats identiques, de telle sorte qu'on doit admettre que, au point de vue de la conduction, les liquides se comportent comme les solides. Il est supposable qu'il en est de même pour les gaz, mais il n'y a pas d'expériences qui permettent de l'affirmer, car les gaz sont tellement mobiles qu'on ne peut y empêcher la convection dont les effets changent complètement les résultats.

Ainsi que nous l'avons dit, on a pu déterminer expérimentalement les rapports des coefficients de conductibilité ; voici quelques nombres obtenus par MM. Wiedemann et Frantz, l'argent étant pris comme terme de comparaison.

Argent	100	Fer	12
Cuivre	74	Acier	12
Or	53	Plomb	8
Laiton	24	Platine	8
Zinc	19	Palladium	6
Étain	14	Bismuth	2

Les nombres donnés par divers auteurs sont loin d'être concordants, ce qui tient sans doute à ce que les échantillons employés présentaient des impuretés dont l'influence peut être très grande.

Ces rapports permettent de calculer les coefficients de conductibilité, si l'on connaît la valeur de cette constante pour l'un des corps. Cette dernière déterminaison a été faite par Péclet pour le plomb, par Newstad et Angstroem pour le fer. Les nombres ci-dessous résultent de ces expériences : ce ne sont pas les coefficients de conductibilité tels que nous les avons définis; ce sont des coefficients pratiques qui en diffèrent par le choix des unités adoptées : l'unité de surface est le mètre carré, l'unité de temps est l'heure, la distance des deux faces est égale à 1 mètre (il est facile de reconnaître que le coefficient pratique est 360 000 fois plus grand que le coefficient théorique que nous avions défini).

On a pour les métaux :

Argent	493 calories.		Fer	59
Cuivre	362	—	Acier	57
Or	268	—	Plomb	42
Laiton	116	—	Platine	41
Zinc	93	—	Palladium	31
Étain	72	—	Bismuth	9

Les quantités de chaleur sont évaluées en calories kilogramme-degré.

Péclet a fait des déterminations analogues sur d'autres corps pour lesquels le coefficient de conductibilité est plus petit, et même beaucoup plus petit, que pour les métaux; aussi ces corps sont-ils dits *mauvais conducteurs* de la chaleur, par rapport aux métaux qui sont de *bons conducteurs*.

Voici quelques-uns des coefficients pratiques de conductibilité donnés par Péclet.

Charbon des cornues à gaz	»	4,96
Marbre gris	»	3,68
Pierre	1,27	2,08
Plâtre gâché	0,33	0,63
Terre cuite	0,51	0,69
Verre	0,75	0,88
Bois	0,09	0,21
Liège	»	0,14
Caoutchouc	»	0,17
Gutta-percha	»	0,17
Coton cardé	»	0,04
Laine cardée	»	0,04

Péclet avait remarqué que la conductibilité du coton cardé était la même quel que fût le degré de compression de cette substance, c'est-à-dire quelles que soient les proportions de coton et d'air; il en avait conclu que le coefficient de conductibilité est le même pour ces deux corps, soit 0,04. Mais des expériences faites ultérieurement ont donné des nombres beaucoup plus faibles.

Hydrogène	0,002 016	Azote	0,000 282
Oxygène	0,000 294	Ac. carbonique	0,000 240
Air	0,000 288		

On voit que les gaz doivent être regardés comme des corps très mauvais

conducteurs; l'hydrogène, quoique mauvais conducteur, conduit cependant la chaleur beaucoup mieux que les autres gaz.

6. — Quoiqu'il y ait une légère différence entre les températures du sang artériel et du sang veineux (0°,2), on peut pratiquement considérer le sang comme étant un liquide à température constante qui circule au milieu de masses médiocrement conductrices. Ces masses sont, par la périphérie, en contact plus ou moins direct avec l'atmosphère : la température périphérique dépend de divers éléments, comme nous le dirons en parlant du refroidissement, mais elle dépend également de la conductibilité des parties comprises entre les vaisseaux où circule le sang et la surface. Il est donc intéressant de connaître cette conductibilité. Des expériences ont été faites à diverses reprises pour la déterminer. Griess (1870) disposait des morceaux de cire à la surface du tissu étudié, puis au milieu du fragment il plaçait une source de chaleur et notait le temps nécessaire pour que la cire entrât en fusion. Plus récemment, Landois employait une méthode analogue : les différents tissus étaient coupés en tranches d'égale épaisseur et étaient placés sur un vase à paroi mince rempli d'eau bouillante ; la surface supérieure avait été enduite de paraffine et on notait le temps après lequel cette substance entrait en fusion, d'où l'on déduisait la conductibilité.

Ces expériences sont peu satisfaisantes ; dans celles de Griess, les conditions sont peu précises ; elles sont plus nettes dans les recherches de Landois, mais les résultats en sont faussés par suite de la température à laquelle les tissus sont portés ; on sait que les matières albuminoïdes, par exemple, sont coagulées à une température inférieure à celle de l'ébullition de l'eau ; les nombres obtenus ne s'appliquent donc pas aux tissus tels qu'ils existent dans l'organisme.

M. H. Bordier a cherché à éviter ces causes d'erreur : les mesures qu'il a prises reposent sur la connaissance que l'on a de la loi de répartition des températures dans une barre dont les extrémités sont à des températures fixes. Il prend une barre cylindrique de cuivre rouge divisée en deux segments que l'on dispose sur le prolongement l'un de l'autre en les séparant par un intervalle de grandeur exactement déterminée ; dans cet intervalle, on intercale la substance étudiée, coupée en fragments cylindriques, ayant une épaisseur précisément égale à cet intervalle. L'une des extrémités est maintenue fixe dans un bain dont on peut faire varier la température à volonté ; l'autre extrémité est pressée par un ressort qui assure le contact entre les surfaces de la tranche du tissu en expérience et celles des deux segments de la barre métallique. On note la température de quatre points de cette barre, situés sur chaque segment dans le voisinage de l'espace qui les sépare. La comparaison de ces quatre températures montre qu'elles ne sont pas réparties comme elles le seraient si la barre était continue : les deux températures des points situés sur le deuxième segment sont plus basses, ce qui tient à ce que le tissu interposé est moins conducteur que le métal, ce que l'on savait. Mais de plus, la comparaison des températures permet de déterminer la conductibilité de la substance intercalée.

Il convient de remarquer que cette méthode, préférable à celles de Griess

et de Landois, n'est pas sans présenter quelques causes d'erreur : on n'y tient pas compte, par exemple, du coefficient de passage de la chaleur du métal au tissu et inversement, et l'on admet que la conductibilité extérieure du tissu par rapport à l'air est la même que celle du métal. Quoi qu'il en soit, les résultats doivent fournir des valeurs comparatives approchées de la conductibilité.

De plus, M. Bordier a comparé la conductibilité des divers tissus à celle de l'air, en répétant une expérience analogue sans interposer aucune matière entre les extrémités voisines des deux segments. La valeur ainsi obtenue pour l'air nous paraît devoir être peu précise ; car, dans ces conditions, la propagation de la chaleur ne doit pas se faire seulement par conduction.

Quoi qu'il en soit de ces réserves, voici les principaux résultats obtenus par M. Bordier qui nous semblent devoir être plus exacts que ceux que l'on avait auparavant.

Air	1	Tissu musculaire (parallèle)	2,48
Tissu osseux (substance spongieuse)	4,45	Tissu tendineux	1,92
Tissu musculaire (perpendiculaire)	2,83	Tissu cartilagineux	1,85
Caillot sanguin de 24 heures	2,71	Tissu adipeux	1,38

7. — Une des conséquences les plus intéressantes au point de vue pratique de la propagation de la chaleur, c'est qu'un corps placé dans un milieu dont la température est différente de la sienne tend à se mettre en équilibre de température avec ce milieu ; il se refroidit s'il est à une température supérieure à celle du milieu, il se réchauffe dans le cas contraire.

Nous nous occuperons d'abord du cas du refroidissement ; comme nous le dirons, d'ailleurs, les phénomènes sont analogues, en sens inverse, dans le cas du réchauffement. Nous étudierons seulement le cas où le corps est placé dans un milieu gazeux, dans l'air, ce qui est le cas ordinaire.

L'effet observé est une résultante, le refroidissement se produit parce que le corps perd de la chaleur par suite de la propagation par la radiation et de la propagation par convection ; la perte de chaleur par conduction peut être négligée dans le cas que nous étudions.

La question se compliquerait si, dans le voisinage du corps considéré, il s'en trouvait d'autres à des températures différentes, mais nous n'examinerons pas ce cas.

Newton a énoncé une loi qui donne la quantité de chaleur perdue par le refroidissement et que l'on peut énoncer ainsi :

La quantité de chaleur perdue par un corps dans l'unité de temps est proportionnelle à la différence des températures du corps et du milieu dans lequel il est plongé.

Si donc nous appelons t et θ respectivement la température du corps et celle de l'enceinte, Q la quantité de chaleur perdue pendant le temps T assez petit pour que l'on puisse considérer les températures comme n'ayant pas varié pendant ce temps, on a :

$$Q = KT(t - \theta)$$

dans laquelle K est une constante dépendant de la nature du corps.

En général, on peut considérer θ comme constant, si la masse du corps est faible, au moins pendant un temps assez court; si le corps est une source de chaleur, c'est-à-dire s'il produit de la chaleur, sa température t peut rester constante : il suffit qu'il produise autant de chaleur qu'il en perd, et, dans ce cas, la formule est applicable.

Elle doit subir une modification si le corps n'est pas une source de chaleur, car forcément alors sa température s'abaisse. Soit t' sa température après le temps T; on peut la déterminer : si, en effet, P est le poids du corps, et c sa chaleur spécifique, on a :

$$Q = Pc(t - t').$$

Mais on ne peut plus appliquer la formule précédente, car la température du corps ne reste pas constante. On peut admettre, sans erreur sensible, que la perte de chaleur est la même que si la température était restée constamment égale à la moyenne $\frac{t+t'}{2}$ des températures extrêmes. La formule devient alors :

$$Q = KT\left(\frac{t+t'}{2} - \theta\right).$$

Ces équations permettent de déterminer t'; en divisant le temps en intervalles assez petits et opérant de proche en proche, on peut déterminer la marche du refroidissement (1).

Les recherches de Dulong et Petit, celles de Péclet, ont montré que, en réalité, la loi du refroidissement n'est pas aussi simple que l'indique la formule que nous avons donnée. On peut, il est vrai, employer la même forme, seulement le coefficient K n'est plus constant pour un corps donné : il dépend à la fois des valeurs de t et de θ; il varie donc non seulement d'une expérience à une autre, mais aussi dans le cours d'une même expérience. Les variations de ce coefficient sont lentes; aussi peut-on, sans erreur appréciable, le regarder comme constant lorsque la différence de température $t - \theta$ ne dépasse pas 25°, ce qui, au point de vue des applications qui nous intéressent, est un cas très fréquent; lorsque cette valeur de $t - \theta$ est dépassée, l'application de la formule donne des erreurs; mais celles-ci ne sont jamais bien considérables dans les circonstances qui correspondent au cas où l'expérience porte sur des êtres vivants. On peut toujours appliquer la formule dans ces cas.

Nous avons dit que le réchauffement obéit aux mêmes lois que le refroidissement, les variations de température étant en sens inverse : des expériences de Rumfort, de La Provostaye et Desains ont montré qu'il en est bien ainsi lorsque le corps et l'air ont des températures peu différentes l'une et l'autre.

(1) Les véritables formules à employer seraient :

$$dQ = K(t - \theta)\, dT \qquad \text{et} \qquad dQ = -Pc\, dt,$$

d'où l'on tire

$$t - \theta = (t_0 - \theta)\, e^{-\frac{K}{Pc}T}$$

Il est aisé de comprendre comment on peut faire les expériences de vérification et comment pour un corps donné on peut déterminer la valeur du coefficient K. Il suffit, en effet, de placer, dans une enceinte où l'atmosphère soit tranquille, un vase en métal mince, par exemple, contenant de l'eau à une température différente de celle du milieu : on note, à des intervalles de temps égaux et assez courts, les valeurs de la température indiquée par un thermomètre placé dans le liquide. On peut s'assurer que les valeurs ainsi obtenues satisfont bien à la formule indiquée précédemment, et de cette formule on déduit K qui est alors la seule inconnue.

Plusieurs précautions sont à prendre : il convient d'agiter le liquide, car sans cela la température n'est pas la même dans tous les points ; — il faut suspendre le vase à des fils mauvais conducteurs ou le faire reposer sur trois cônes de liège, également mauvais conducteurs, pour éviter les pertes qui se produiraient par les supports et qui ne seraient pas négligeables si ceux-ci étaient constitués par des corps bons conducteurs ; enfin, il faut que l'observateur fasse les observations à distance, visant le thermomètre avec une lunette, afin que sa présence n'introduise pas une cause d'erreur par la quantité de chaleur qu'il peut envoyer au corps ou celle qu'il peut en recevoir.

8. — Le cas des êtres vivants n'est pas aussi simple que celui que nous venons d'indiquer : les animaux produisent constamment de la chaleur ; aussi les animaux supérieurs, pour ne parler que de ceux-là, ne se refroidissent pas suivant la loi indiquée par la formule de Newton, lorsqu'ils sont placés dans un milieu de température inférieure à la leur. D'autre part, par l'évaporation dont ils sont ou peuvent être le siège, ils sont susceptibles d'absorber de la chaleur ; l'effet produit par ce phénomène peut même être plus considérable que l'effet inverse qui résulte des actions chimiques qui se produisent dans l'organisme : aussi, placé dans un milieu dont la température est supérieure à la sienne, un animal ne se réchauffe-t-il pas suivant la loi de Newton, ou même peut ne pas s'échauffer.

L'observation montre qu'un animal (mammifère, oiseau) conserve une température constante, du moins sensiblement, lorsqu'il est placé dans un milieu dont la température diffère de la sienne.

La formule de Newton appliquée à l'unité de temps peut s'écrire

$$Q = Kt - K\theta$$

si la température du milieu est inférieure à celle de l'homme, et dans cette formule Kt est constant.

Il résulte de là que la quantité de chaleur fournie par l'animal dépend de K, coefficient de refroidissement (1) ; celui-ci dépend non seulement de la forme du corps, mais aussi de l'état de la surface : c'est ce que démontrent les expériences de calorimétrie faites sur des animaux dont on recouvrait le corps de vernis ou de glycérine. La présence de la sueur peut également

(1) Le coefficient dont il s'agit diffère du pouvoir émissif, quoiqu'il en dépende dans une certaine mesure parce qu'il y a convection en même temps que radiation.

modifier la valeur du coefficient de refroidissement, et, sans doute, celui-ci change également pour certains états de maladie.

Il n'est pas jusqu'à la variation de couleur qui ne doive modifier la valeur du coefficient de refroidissement, puisqu'on sait que le pouvoir émissif en dépend. M. Richet, dans cinq expériences concordantes, a trouvé que les lapins blancs ne dégagent que les 0,75 de la chaleur dégagée par les lapins gris ou noirs, dans le même temps. On a remarqué d'ailleurs que dans les pays froids le pelage des animaux est blanc, tandis qu'il est coloré dans les pays chauds ; il y a même des animaux qui ont une fourrure d'hiver claire et une fourrure d'été foncée.

Le coefficient de refroidissement K dépend à la fois de la forme et de la surface du corps ; mais pour des animaux de même espèce, semblables de forme, il doit varier avec la surface S et on peut le représenter par l'expression kS, où k est constant.

On a donc

$$Q = kS(t - \theta)$$

La quantité de chaleur produite par un animal dans l'unité de temps doit donc croître comme sa surface si θ est constant, puisque t est fixe.

Mais on voit que $\frac{Q}{S}$ est constant pour une espèce donnée, la quantité de chaleur produite par unité de surface est constante : c'est ce qu'on a désigné sous le nom de *production spécifique de la chaleur*.

D'autre part, la quantité de chaleur produite dépend de la masse des organes dans lesquels se font les combustions ; elle est proportionnelle à cette masse ou au poids P de l'animal : elle peut être représentée par qP, q étant la quantité de chaleur dégagée par 1 kilogramme de l'animal. On a donc

$$qP = kS(t - \theta)$$

ou

$$q = k\,\frac{S}{P}\,(t - \theta).$$

On sait que pour des corps semblables les surfaces varient proportionnellement au carré et les volumes ou les poids proportionnellement au cube des dimensions homologues. Si donc l est la longueur de l'animal, α et β des coefficients constants, on peut poser :

$$S = \alpha l^2, \qquad P = \beta l^3,$$

il vient donc

$$q = \frac{k\alpha}{\beta l}\,(t - \theta).$$

La température t étant fixe pour une espèce donnée, on voit que si θ est constant la quantité de chaleur dégagée pour une unité de poids doit être d'autant plus considérable que l'animal est plus petit.

Les résultats auxquels nous avons été conduits ont été vérifiés expérimentalement (Voy. Chaleur animale).

Comme nous l'avons dit, la quantité de chaleur Q dégagée par l'animal dans l'unité de temps est la différence entre la chaleur produite dans le même temps C et la quantité de chaleur perdue par évaporation E. On a donc, en réalité :

$$C - E = Kt - K\theta.$$

Si, dans le milieu de température θ dans lequel est plongé l'animal, l'air vient à être agité, l'évaporation augmente et E croît. Pour que la température reste constante, il faut que C croisse également ; mais les variations des actions qui produisent C ne sont pas instantanées ; aussi, au début, C restant constant et E augmentant, la température t s'abaisse, l'animal se refroidit.

Enfin il résulte de la formule

$$Q = K(t - \theta)$$

que, pour un animal donné, la quantité de chaleur produite pendant l'unité de temps doit croître au fur et à mesure que la température extérieure diminue.

C'est bien ce que montrent les expériences calorimétriques (Voy. Chaleur animale), au moins tant que θ ne descend pas au-dessous de 14 ou 15°. Mais il n'en est plus ainsi pour les températures inférieures. Cela tient à ce que, par suite de l'action de l'air froid, la circulation périphérique devient moins active et que, quoique la température centrale ne change pas, celle de la peau s'abaisse ; or c'est précisément cette dernière t qui entre dans la formule ; dès lors, t n'étant pas constant, la conséquence à laquelle nous venons de parvenir n'est pas applicable.

9. — Les conditions du passage de la chaleur du corps chaud à l'air extérieur ne sont pas aussi simples pour un animal que pour l'expérience de Rumfort que nous avons citée plus haut. Dans celle-ci, l'eau dont on déterminait la température était contenue dans un vase de métal mince, de telle sorte que, à cause de la faible épaisseur du métal et à cause de sa bonne conductibilité, on pouvait admettre que la température de la surface extérieure en contact avec l'air ne différait pas sensiblement de celle de l'eau.

Chez les animaux, les parties centrales dont la température reste constante (animaux supérieurs) sont séparées de l'air par des couches de graisse plus ou moins épaisses, par la peau et, chez la plupart des animaux, par des poils ou des plumes; l'épaisseur de ces parties peut être assez grande, et de plus les substances qui les constituent sont de mauvais conducteurs, les poils et les plumes particulièrement, non pas tant par eux-mêmes que par les masses d'air qu'ils emprisonnent, et nous avons vu que l'air est un très mauvais conducteur.

Il résulte de là que la température périphérique diffère notablement de la température centrale ; elle n'est pas la même partout, d'ailleurs.

Si l'on voulait appliquer la formule de Newton, il faudrait y remplacer t par la température périphérique, celle de la partie qui est en contact avec

l'air. Si l'on voulait conserver la température centrale, il faudrait modifier la formule pour tenir compte de l'effet de la propagation à travers les masses graisseuses, la peau, les poils ou les plumes.

Les observations et les expériences ont mis nettement en évidence l'influence du rôle protecteur des fourrures chez les animaux ; on a remarqué, en effet, que, d'une manière générale, les fourrures des animaux sont d'autant plus épaisses que ceux-ci habitent des régions plus froides, ce qui explique que leur température puisse rester indépendante de celle de l'atmosphère : la différence peut être considérable, car on a signalé dans les régions polaires des loups et des renards qui avaient près de 40°, alors que, dans l'air, le thermomètre marquait une température de — 35 degrés.

Des expériences ont été faites à ce sujet, notamment par M. le professeur Ch. Richet qui a montré qu'un animal rasé dégage plus de chaleur qu'à l'état normal ; il a trouvé comme moyenne de cinq expériences faites sur des lapins de même poids, si l'on représente par 100 la quantité de chaleur dégagée par un lapin normal, que celle d'un lapin rasé est de 160. Laulanié, dans des conditions analogues, a trouvé le rapport 100 à 151, très voisin du précédent ; il est vrai que, après quelques jours, le dernier nombre était tombé à 139, mais la différence provient probablement de la croissance du poil coupé et peut-être aussi de l'accoutumance qui modifie la température périphérique.

Pour l'homme, qui ne possède pas de fourrure, les conditions sont moins favorables que pour les animaux ; aussi, sauf dans les régions chaudes, où les pertes de chaleur sont faibles, a-t-il obvié à cet inconvénient par l'emploi de vêtements qui ont pour effet de diminuer ces pertes.

Des expériences directes ont montré que, comme on pouvait s'y attendre, la présence de vêtements diminue la quantité de chaleur dégagée par l'homme dans un temps donné. Rumpel et Rübner ont reconnu que la présence du vêtement diminue la perte de chaleur et, dans un cas, la différence a atteint 47 p. 100. D'autre part, d'Arsonval, expérimentant sur un individu du poids de 74 kilogrammes, dans une atmosphère à la température de 18°, a trouvé que la chaleur perdue, étant de 124 calories par heure pour l'individu nu, ne dépassait pas 79 calories lorsque l'individu était habillé.

Ces résultats sont trop bien en concordance avec ce qu'il était possible de prévoir pour qu'il soit nécessaire d'insister.

10. — L'action des vêtements, comme celle des poils et des plumes des animaux, est complexe ; elle dépend certainement de la matière constitutive de ces vêtements dont la conductibilité intervient directement, mais elle dépend aussi de l'air emprisonné dans les tissus ou entre les diverses pièces du vêtement, et cet effet est sans doute prépondérant, à cause de la très faible conductibilité des gaz.

Péclet a donné la valeur du coefficient de conductibilité de quelques étoffes déterminé par une méthode analogue à celle qui avait été employée pour les métaux. Voici quelques-uns des chiffres qu'il a trouvés :

Coton cardé........................	»	0,040
Laine cardée....................	»	0,044

Molleton de coton	»		0,040
Molleton de laine	»		0,024
Édredon	»		0,039
Calicot neuf	»		0,050
Toile de chanvre neuve	0,054	à	0,052
— vieille	0,058	—	0,043
Papier blanc à écrire	0,085	—	0,043
Papier gris non collé	0,048	—	0,034

Mais ces nombres, pour la raison que nous avons indiquée, ne renseignent pas sur la valeur d'une étoffe comme vêtement, et il convient d'avoir recours à des mesures directes faites dans des conditions analogues à celles qui sont réalisées dans les vêtements.

Coulier a exécuté une série de recherches en 1858 sur ce sujet : il prenait un vase cylindrique en laiton mince, d'une capacité de 500 centimètres cubes, qu'il suspendait dans une atmosphère calme après l'avoir rempli d'eau à 50° environ, et il notait la température de ce liquide à l'aide d'un thermomètre ; il attendait que cette température fût descendue à 40° et notait le temps nécessaire pour que le thermomètre ne marquât plus que 35°, puis il recommençait la même expérience après avoir recouvert le vase d'un manchon formé avec l'étoffe qu'il voulait essayer : l'étoffe constituait un antidéperditeur de chaleur d'autant meilleur qu'il fallait un temps plus long pour produire le même abaissement de température. Voici quelques résultats obtenus pour la durée du refroidissement de 40 à 35 degrés :

	m	s
Laiton non recouvert	18	12
Toile de coton pour chemises	11	39
— doublure	11	15
Toile de chanvre	11	25
Drap bleu foncé pour tunique	14	45
Drap garance pour pantalon	14	50
Drap bleu gris pour capote	15	05

La longue durée observée pour le laiton vient de la faible valeur de son pouvoir émissif et montre que pour les étoffes la mauvaise conductibilité ne compense pas complètement l'augmentation du pouvoir émissif.

Il importe de remarquer que, comme nous l'avons indiqué précédemment, à cause de la faible valeur de la variation de température, l'action est sensiblement la même que si la température du vase était restée constamment égale à la moyenne des températures extrêmes, soit 37°,5. On voit que les conditions sont les mêmes qne si les étoffes avaient été placées sur le corps d'un homme, au moins au point de vue de la température. Quoique les expériences de Hammond, en 1853, aient confirmé les résultats obtenus par Coulier, il importe de remarquer que ces résultats ne renseignent pas absolument sur la valeur des vêtements, parce que ceux-ci ne sont pas appliqués sur la peau comme l'étaient les manchons d'étoffe sur le vase de laiton et qu'ils emprisonnent toujours une certaine quantité d'air. Ajoutons qu'il faudrait également tenir compte de la facilité avec laquelle les étoffes se laissent traverser ou s'imbibent par les produits de la transpiration cutanée. Aussi, pour être vraiment renseigné sur la valeur d'un vêtement au point de vue

qui nous occupe, il faudrait faire des mesures calorimétriques sur le même individu placé dans les mêmes conditions, sauf le costume qui différerait d'une expérience à l'autre.

11. — Dans la pratique, l'influence des vêtements sur le réchauffement sous l'influence de la chaleur venant de l'extérieur ne peut pas se déduire des expériences précédentes, quoiqu'il puisse sembler, au premier abord, qu'une substance doit agir de la même façon, quel que soit le sens dans lequel elle est traversée par la chaleur. C'est que les conditions dans lesquelles l'étude du réchauffement est réellement intéressante au point de vue pratique sont celles dans lesquelles l'homme, soumis à l'action des rayons solaires, est placé dans une atmosphère dont la température est inférieure à la sienne propre. L'effet observé est donc complexe : il est la résultante de la quantité de chaleur envoyée par le soleil et absorbée par l'homme et de la quantité de chaleur que celui-ci a perdu par son contact avec l'air extérieur. Nous venons de dire comment varie celle-ci ; quant à la quantité de chaleur absorbée, elle dépend de la température indiquée par un thermomètre exposé aux rayons solaires, mais elle dépend aussi du pouvoir absorbant du tissu sur lequel tombent ces rayons.

Coulier a fait des expériences pour déterminer l'influence des rayons solaires sur divers tissus ; mais il n'a obtenu, par la manière dont il a opéré, que des indications sur le pouvoir absorbant ; il est difficile d'en rien déduire, car nous ne pouvons utiliser les valeurs fournies dans les autres expériences, parce que la face du tissu exposée aux rayons solaires est à une température supérieure à celle qu'elle aurait prise sous l'action de ceux-ci. Les conditions ne sont donc pas les mêmes ; aussi ne croyons-nous pas devoir insister sur les résultats numériques donnés par Coulier. Disons cependant qu'ils tendent à prouver, comme on pouvait s'y attendre, qu'il y a avantage à employer des étoffes blanches, les corps blancs ayant un faible pouvoir absorbant.

INFLUENCE DE LA PRESSION SUR LA VIE

Par MM. les Drs P. REGNARD et P. PORTIER

I. — PRÉLIMINAIRES

Atmosphère. Sa composition. — Le globe terrestre est entouré d'une masse gazeuse dont certains éléments sont fixes, tandis que d'autres sont variables; d'autres enfin n'ont qu'une existence accidentelle.

Éléments fixes. — Les éléments fixes, ceux qui existent toujours dans la même proportion quelle que soit la latitude ou l'altitude de l'endroit où l'air a été recueilli, sont l'azote, l'oxygène et une série de nouveaux gaz découverts depuis 1894 par lord Rayleigh et W. Ramsay : argon, krypton, néon, métargon.

Les proportions de ces gaz, d'après les recherches les plus récentes (Leduc, 1896), seraient les suivantes en volume :

Oxygène	21
Azote	78,06
Mélange des nouveaux gaz	0,94
	100,00

Les recherches poursuivies depuis plus d'un siècle successivement par Cavendish (1781), Gay-Lussac, Humboldt, Brünner, Dumas, Boussingault, Bunsen, Regnault et Reiset, en opérant sur l'air recueilli dans les régions les plus diverses et pendant les saisons les plus variées, ont montré que les proportions d'oxygène et d'azote ne variaient pas (1). Les recherches les plus récentes sur l'air recueilli à une altitude de plus de 15 000 mètres, au moyen des ballons-sondes, ont conduit MM. Cailletet, Müntz et Th. Schlœsing fils aux mêmes résultats.

Éléments variables. — Les éléments variables de l'atmosphère sont l'acide carbonique, la vapeur d'eau, l'ozone et l'ammoniaque.

L'acide carbonique existe dans l'air en moyenne dans la proportion de 3 à

(1) A la vérité, dans toutes ces analyses, on comptait comme azote le mélange (azote + argon, néon, etc.); mais, d'après ce que nous savons des propriétés chimiques des nouveaux gaz, leur quantité doit être remarquablement fixe; ils ne peuvent contracter aucune combinaison et c'est à ce fait qu'ils doivent leur existence dans l'atmosphère. Ce sont des *résidus* qui n'ont pas trouvé d'emploi lors de la formation des composés qui constituent la croûte terrestre.

4 p. 10 000. Cette quantité peut augmenter au voisinage des foyers producteurs de ce gaz et atteindre 6 p. 10000 et même 1 p. 1 000 dans l'air des villes, par exemple; mais ce ne sont là, en quelque sorte, que des accidents locaux qui peuvent intéresser le chimiste, mais qui ne sauraient avoir de signification importante pour le biologiste.

L'atmosphère, en effet, continuellement brassée par les courants aériens, récupère bien vite sa composition normale, et il est prouvé, par les nombreuses recherches, faites jusqu'à ce jour, que la proportion d'acide carbonique de l'air est sensiblement la même, que cet air soit pris en pleine campagne au voisinage de la surface de la terre, au sommet des montagnes les plus élevées et même aux altitudes considérables atteintes par les ballons-sondes.

Il n'en est plus de même pour la vapeur d'eau. Celle-ci provient de l'évaporation qui se produit constamment au niveau de la surface des eaux qui recouvrent près des trois quarts de la terre. Cette évaporation est soumise à des lois physiques parfaitement déterminées; elle est en particulier considérablement entravée ou accélérée par les variations de température dans l'un ou l'autre sens.

L'air, qui s'est ainsi saturé de vapeur d'eau au contact des nappes liquides, peut, lorsqu'il est transporté sur les continents, ou bien se sursaturer si la température vient à baisser et donner lieu à des précipitations (pluie, neige) ou bien se raréfier en vapeur d'eau si la température vient à s'élever ou s'il se dessèche par le contact de corps avides d'eau.

Il résulte du jeu de ces différents phénomènes que la vapeur d'eau peut varier en poids de 1 à 32 grammes par mètre cube d'air.

L'ozone est une variété d'oxygène dans lequel chaque molécule est formée de trois atomes, l'oxygène ordinaire n'en possédant que deux dans sa molécule. C'est cet atome d'oxygène surajouté, et pour ainsi dire en équilibre instable, qui donne à ce gaz ses propriétés oxydantes.

L'ozone a sa source dans l'action de l'électricité atmosphérique sur l'oxygène de l'air; il existe en quantité minime, mais variable d'un moment à l'autre et d'un lieu à un autre. Il paraît être plus abondant dans l'air des montagnes que dans celui des plaines. Le même jour, on trouve en effet dans 100 mètres cubes d'air $2^{mgr},3$ d'ozone à Paris et $9^{mgr},4$ aux Grands-Mulets (3 020 mètres d'altitude).

L'ammoniaque existe dans l'air à l'état d'azotate et d'azotite. Ces composés, qui n'existent guère qu'à l'état de traces, proviennent de l'action de l'électricité atmosphérique sur l'azote et l'oxygène de l'air.

Éléments accidentels. — Ce sont l'oxyde de carbone, le méthane ou gaz des marais, l'hydrogène sulfuré, l'acide azoteux, l'iode (presque uniquement à l'état de matière organique ; Gautier), etc.

La plupart de ces composés proviennent de l'action des bactéries sur les matières organiques en décomposition. Enfin, des particules très ténues de certains sels (chlorure, sulfate de sodium, sulfate de chaux, etc.), sont transportées par les courants atmosphériques.

En résumé, nous voyons que les éléments constituants de l'atmosphère qui

intéressent au plus haut point le biologiste sont : l'oxygène, l'azote et l'acide carbonique, et que la proportion de ces gaz est restée sensiblement fixe pendant la durée du siècle qui vient de s'écouler. Il est très probable qu'il en est de même pour toute l'époque géologique qui se continue sous nos yeux (1).

Les différentes causes qui tendent à appauvrir l'atmosphère en oxygène (respiration, combustions vives ou lentes) sont compensées par des actions inverses dans lesquelles l'oxygène est mis en liberté (assimilation chlorophyllienne, par exemple). Il est dans la nature quantité de ces mécanismes qui tendent à maintenir constante la composition de l'atmosphère en agissant d'une façon automatique. Un des plus curieux a été clairement indiqué par M. Schlœsing (2). Les eaux, celles de la mer notamment, contiennent des bicarbonates (de chaux en particulier). Lorsque la pression de l'acide carbonique de l'air diminue, ces bicarbonates se dissocient en carbonate neutre et acide carbonique qui se dégage. Ce dernier gaz vient-il au contraire à augmenter de pression dans l'atmosphère, une partie se fixera sur les carbonates neutres pour les amener à l'état de bicarbonates.

C'est par le jeu de régulateurs automatiques analogues dont beaucoup nous sont probablement inconnus que la permanence de composition de l'atmosphère est assurée.

Les gaz qui constituent l'atmosphère, et en particulier l'oxygène et l'acide carbonique, jouent un rôle considérable dans la physiologie des êtres vivants ; non seulement des êtres vivants qui sont adaptés au milieu aérien, mais aussi de ceux qui sont adaptés au milieu aquatique. Cette adaptation au milieu aquatique consiste essentiellement dans ce fait que l'animal qui l'a subie est capable d'extraire, pour subvenir aux besoins de son organisme, les gaz qui sont dissous dans l'eau. Les gaz de l'atmosphère se dissolvent en effet dans le milieu aquatique suivant la loi de Dalton. On voit qu'il y a ainsi pénétration réciproque des deux milieux aquatique et aérien : vapeur d'eau dans l'air, gaz dissous dans l'eau.

Hauteur de l'atmosphère. — Les expériences de Torricelli, de Périer, de Pascal nous ont appris que l'atmosphère qui entoure notre globe était pesante. Au niveau de la mer et à la latitude de 45°; la pression de l'atmosphère fait équilibre à une colonne de mercure de 76 centimètres de hauteur environ. Cette pression varie suivant qu'on se rapproche du pôle ou de l'équateur; elle est en effet proportionnelle à l'accélération de la pesanteur, quantité variable elle-même avec la latitude; elle diminue à mesure qu'on s'élève dans l'atmosphère et enfin, en un même point, elle est variable d'un moment à un autre. Ces variations locales de la pression traduisent les perturbations atmosphériques; nous devons en effet nous figurer la surface libre de la couche d'air qui entoure la terre non pas à l'état d'immobilité, mais comme composée de vagues énormes qui, augmentant ou diminuant la hauteur de l'atmosphère, produisent en un point donné de la surface terrestre ces alter-

(1) On s'accorde au contraire à penser que la composition de l'atmosphère a varié dans des limites étendues depuis l'apparition de la vie sur la surface du globe.

(2) Schlœsing, *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 1880. — Voy. aussi à ce sujet : Dastre, *Revue des Deux Mondes*, 1898; Bunge, *Chimie biologique*.

natives d'excès ou de diminution de pression qu'accusent les oscillations de la colonne barométrique.

Connaissant la pression (évaluée au moyen du baromètre) qu'exerce l'atmosphère sur une surface donnée ; connaissant d'autre part le poids du litre d'air mesuré à 0° et à 760 millimètres ($1^{gr},293$), il semble qu'on puisse en déduire facilement la hauteur de l'atmosphère.

En réalité, il n'en est rien ; la couche d'air qui entoure le globe terrestre n'est pas homogène, l'air est en effet très compressible ; d'autre part, les forces auxquelles sont soumises chacune de ses molécules (accélération de la pesanteur, force centrifuge) varient à mesure qu'on s'éloigne de la terre. Il en résulte que le poids d'un même volume d'air pris à la même température, mais à des hauteurs croissantes, serait de plus en plus faible ; autrement dit, si on partage la couche gazeuse qui entoure la terre en zones concentriques, celles-ci présenteront des densités de plus en plus faibles à mesure qu'on s'éloignera de la surface terrestre.

Cette loi de décroissance des densités est complexe ; c'est ce qui fait qu'il est difficile de connaître la hauteur exacte de l'atmosphère et aussi de déduire d'une simple lecture barométrique l'altitude à laquelle on est parvenu lorsqu'on s'élève en ballon ou qu'on gravit une montagne.

Les calculs de Laplace l'avaient conduit à assigner à la hauteur de l'atmosphère la valeur de 42 000 kilomètres. Pouillet adopte le chiffre de 88 000 kilomètres. Les valeurs déduites d'observations astronomiques oscillent entre 75 000 kilomètres et 320 000 kilomètres. On voit que nous sommes loin d'être entièrement fixés sur la hauteur de notre atmosphère.

Mesure de l'altitude au moyen du baromètre. — Il est impossible, comme nous l'avons vu, de déduire par un calcul simple l'altitude d un lieu de la hauteur du baromètre au même lieu.

On est obligé d'employer la formule suivante, due à Laplace :

$$X = 18\,393^{m} \times \log \frac{H}{h} \left(1 + \frac{2\,(t + t')}{1000}\right) (1 + 0{,}002837 \cos 2\,\lambda).$$

dans laquelle X désigne la hauteur cherchée, H et h les hauteurs barométriques respectivement au pied de la montagne (ou au niveau de la mer) et au point considéré (ces deux nombres ayant subi les corrections de capillarité, de température) ; t et t' les températures dans les mêmes lieux et λ la latitude.

Quand il s'agit d'altitudes plus faibles ne dépassant pas 1 000 mètres, on peut employer cette formule plus simple qui est due à Babinet :

$$X = 16\,000^{m} \frac{H - h}{H + h} \left(1 + \frac{2\,(t + t')}{1000}\right).$$

Calcul en kilogrammes de la pression supportée par une surface donnée. — Au niveau de la mer, et par un temps normal, chaque surface de 1 centimètre carré supportera une pression égale au poids d'une colonne de mercure ayant pour base 1 centimètre carré et pour hauteur 76 centimètres.

La densité du mercure étant 13,6, le poids de la colonne considérée sera donc :

$$76 \times 13{,}6 = 1\,033^{gr},6 \quad \text{ou} \quad 1^{kgr},0336.$$

La surface du corps d'un homme de taille moyenne supportera ainsi du fait de la pression atmosphérique un poids de 15000 kilogrammes.

Cette pression s'exerçant en tous sens et le corps des animaux étant formé de matériaux incompressibles, les pressions partielles en lesquelles peut se décomposer la pression totale s'annulent deux à deux et l'animal n'a aucune conscience de la pression qu'il subit.

Liste des principaux lieux habités avec leur altitude et la pression barométrique correspondante.

Stations.	Altitude en mètres.	Indications du baromètre.
La mer	0	76
Dijon	217	74
Lucerne	437	72
Berne	574	71
Fribourg	656	70
Lauterbrunnen	797	69
Seelisberg	845	68
Chamonix	1.050	67
Airolo	1.148	66
Rosenlaui	1.330	64
Andermatt	1.444	63
Davos-Platz	1.560	62
Samaden	1.728	61
Saint-Moritz	1.856	60
Arolla	2.003	59
Belalp	2.137	58
Saint-Bernard	2.370	56
Etna	3.310	50
La Paz	3.720	48
Futur hôtel du sommet de la Jungfrau	4.173	45
Observatoire du mont Blanc	4.810	42
Passe de Kara-Korum	5.650	38
Cotopaxi	5.945	36
Chimborazo	6.420	34
Tissandier en ballon	8.600	26
Mont Everest (Le plus haut point du globe)	8.840	24,8
Glaisher en ballon	8.838	»
P. Bert dans les cloches de la Sorbonne	»	»
Ang. Mosso dans la chambre pneumatique	11.650	19,2

Hauteur de l'atmosphère liquide. — Contrairement à l'atmosphère aérienne, l'atmosphère liquide présente de très grandes différences de hauteur d'un point à un autre.

Laissant de côté les régions d'eau douce (fleuves et lacs dont la profondeur dépasse rarement une centaine de mètres, voyons quelles profondeurs peut atteindre la mer.

Et d'abord une règle générale bien connue des marins : telle côte, tel fond. Cela veut dire qu'à une côte plate correspond une mer peu profonde et dont le fond en pente douce ne plonge que très progressivement à mesure qu'on s'éloigne de cette côte. Au contraire, à une côte abrupte, à l'extrémité d'une

chaîne de montagnes qui aboutit à la mer, comme les Pyrénées par exemple, correspond une mer déjà très profonde à une faible distance de la côte.

Les mers qui s'enfoncent entre les côtes découpées de l'Europe septentrionale n'ont qu'une faible profondeur; ainsi, dans la Manche, la mer du Nord, la Baltique, la profondeur moyenne est inférieure à 100 mètres. La Méditerranée nous offre déjà une profondeur moyenne de 1 300 mètres avec des abîmes qui peuvent atteindre 4000 mètres. Dans l'Atlantique nord, nous atteignons une moyenne de 3 500 mètres avec un maximum de 5 000 mètres près des îles du Cap-Vert. L'Atlantique sud donne une moyenne un peu supérieure à celle de l'Atlantique nord. Enfin, avec l'océan Pacifique, nous atteignons une moyenne de 4285 mètres et dans la mer du Japon la plus grande profondeur connue, 8 573 mètres (Fosse de Tuscarora) (1).

Quant aux profondeurs de 12 000 et 15000 mètres, trouvées dans certains sondages anciens, elles n'existent pas et sont le fait de déterminations fausses dues à des instruments imparfaits. Elles n'ont jamais été retrouvées avec les appareils récents (bathomètres et machines à sonder) qui fournissent des indications certaines.

Calcul de la pression à une profondeur donnée. — Nous avons vu qu'au niveau de la mer il fallait une colonne de mercure de $0^m,760$ pour faire équilibre à la pression atmosphérique. Or, la densité du mercure étant 13,6, il en résulte que, pour faire équilibre à la même pression atmosphérique, il faudra une colonne d'eau égale à $13,6 \times 760 = 10^m,33$. C'est en effet ce que prouve également l'expérience directe. Ainsi, en chiffres ronds, chaque fois qu'on s'enfoncera dans la mer d'une profondeur de 10 mètres, on supportera une atmosphère de plus de pression.

Un animal placé à 100 mètres de profondeur supportera une pression de 10 atmosphères ; à 200 mètres, il supportera 20 atmosphères, etc. Un animal qui gagnera le fond de la Fosse de Tuscarora supportera l'énorme pression de 857 atmosphères ; chaque centimètre carré de la surface du corps de cet animal subira une pression de 885 kilogrammes environ.

II. — ACTION MÉCANIQUE DE LA PRESSION

Nous avons vu qu'un animal qui vit dans l'air au niveau de la mer supporte une pression de 1 kilogramme environ sur chaque centimètre carré de sa surface. Lorsque cet animal, gravissant une montagne ou s'élevant dans les airs, si c'est un oiseau, parvient à 5 590 mètres de hauteur environ, soit à la Passe de Karakorum, le baromètre ne donnant plus que 38 centimètres de hauteur de mercure, à cette altitude, il en résulte que chaque centimètre carré de la surface de l'animal ne supportera plus qu'une pression de 500 grammes.

Au contraire, un animal marin s'enfonçant dans les eaux de l'Océan supportera déjà à 100 mètres une pression de 10 kilogrammes sur chaque centimètre carré de la surface du corps et arrivera même à subir des pressions dépassant

(1) Entre les îles Fiji et la Nouvelle-Zélande, par 176°39′ long. O. (méridien de Paris) et 30°28′ lat. S., on a trouvé la profondeur de 9 427 mètres (Expédition de Pinguin, 1895).

800 kilogrammes par centimètre carré, lorsqu'il gagnera les plus grandes profondeurs connues.

Quels vont être les effets de ces changements de pression déjà importants dans le premier cas et considérables dans le second ?

L'animal qui s'élève dans l'air va-t-il éprouver un sentiment de bien-être comparable à celui qu'on éprouve lorsqu'on est subitement allégé d'un lourd fardeau ?

Et l'animal qui descend dans les profondeurs de la mer va-t-il se sentir comprimé sous la pression formidable qu'il supporte ?

On a admis pendant longtemps théoriquement l'existence de ces actions sur l'organisme vivant, et, qui plus est, on a cru observer ces effets de la diminution ou de l'augmentation de pression. C'est ainsi que « Gay-Lussac se sent en quelques minutes, pendant une ascension dans les Pyrénées, enlever 10 000 kilogrammes de dessus les épaules (1) », et par contre M. Foley, parlant du travail dans l'air comprimé, dit : « Dès qu'on entre dans les tubes, on est aplati (2). » Ce sont là de curieux exemples d'auto-suggestion.

En réalité, ces manifestations des variations de pression ne peuvent se produire sur l'organisme. Le corps des animaux est en effet constitué par des éléments solides ou liquides qui, tous deux, sont sensiblement incompressibles ; il en résulte que toute pression exercée en un point de la surface du corps se transmet intégralement dans toutes les directions : c'est là un principe de physique élémentaire. Le corps des animaux étant tout entier plongé dans l'atmosphère liquide ou gazeuse, toutes ces pressions se font équilibre, s'annulent. Du fait de l'augmentation ou de la diminution de pression, il ne saurait y avoir refoulement des humeurs au centre de l'organisme ou aspiration des mêmes liquides à la périphérie.

Les vaisseaux, aussi bien ceux qui sont situés dans la profondeur que ceux qui sont superficiellement palcés, sont constamment remplis d'un liquide incompressible et, par conséquent, supportent la même pression sur leur paroi interne et sur leur paroi externe. Il en résulte qu'une variation de pression dans un sens ou dans l'autre ne saurait amener aucune modification dans leur calibre.

Quand on place un animal dans une cloche où on raréfie l'air, il n'en résulte pas, comme on l'a dit à tort, que, emprisonné dans cette « grande ventouse », tous ses liquides vont être attirés à la périphérie.

Ce qui fait que les choses se passent ainsi dans le cas de la ventouse, c'est que précisément la diminution de pression ne s'exerce que sur une portion limitée de la surface. Tout le reste du corps restant soumis à l'action de la pression atmosphérique, celle-ci se transmettant en tous sens aux tissus, les refoule, eux et surtout les liquides plus facilement déplaçables, à l'intérieur de la ventouse où existe un vide partiel. Évidemment, il n'en va plus de même lorsque l'animal *tout entier* est à l'intérieur de la ventouse.

Les variations de pression ne peuvent avoir d'action en tant qu'agents mécaniques qu'autant qu'il existe, au sein des tissus, des collections de fluides

(1) P. Bert, *Pression barométrique*, p. 356.
(2) *Ibid.*, p. 514.

compressibles. C'est en effet ce qui se passe, comme nous le verrons, pour les gaz intestinaux et pour la vessie natatoire des poissons.

Mais si les variations de pression n'influencent physiquement que dans une très faible mesure les animaux qui y sont soumis, elles ont au contraire une action très manifeste lorsqu'on se place sur le terrain chimique.

Les quantités de gaz et particulièrement d'oxygène fixés par les liquides de l'économie varient dans de grandes proportions avec la pression ; il en résulte sur la nutrition un retentissement souvent important. C'est ce que les chapitres suivants nous apprendront.

Action de la pression de l'eau.

Jusqu'à une époque très voisine de la nôtre, les naturalistes enseignèrent que les profondeurs de la mer étaient inhabitées.

Déjà à partir de 200 mètres, la faune n'était plus représentée que par quelques rares animaux de couleur sombre. Au-dessous de 600 mètres, toute vie cessait, il n'existait plus que d'immenses abîmes *azoïques*, vastes solitudes où ne pénétrait jamais le moindre rayon de lumière; on se plaisait à y voir le pendant des déserts glacés des montagnes les plus élevées.

Cette manière de voir avait déjà été battue en brèche par les découvertes de John Ross en 1818, celles de James Ross en 1847 qui recueillirent des crustacés, des annélides et une étoile de mer au moyen de dragages pratiqués par 1 800 mètres et plus de profondeur. Cependant les naturalistes tenaient tant à l'idée qu'ils avaient adoptée qu'ils s'efforçaient de réfuter, par des objections (sans grande valeur à la vérité), les découvertes de ces explorateurs. Les animaux ramenés à la surface, disaient-ils, avaient été capturés pendant le retour de la drague et à une profondeur relativement faible. C'était, tout au moins en ce qui concerne l'étoile de mer, une explication fort hasardeuse.

Enfin, il fallut bien se rendre à l'évidence lorsqu'en 1865 Hervé-Mangon remit à Alphonse Milne-Edwards un tronçon du câble télégraphique qui relie la Sardaigne à l'Algérie, câble qui s'était rompu à 2 000 mètres de profondeur. Ce tronçon était encroûté d'une masse de polypiers qui avaient plus que doublé son volume. Aucune objection n'était possible cette fois ; il avait fallu de longues années à ces animaux pour édifier les assises de ce squelette. Des acéphales étaient d'ailleurs également fixés sur ce câble.

Du reste, les recherches qui s'organisèrent à la suite de cette découverte, les expéditions du *Corwin*, du *Porcupine*, du *Challenger*, du *Blake*, du *Travailleur*, du *Talisman*, les nombreuses campagnes du prince Albert I[er], de Monaco, à bord de l'*Hirondelle* et de la *Princesse-Alice*, ont non seulement confirmé ces premiers résultats, mais montré la richesse et la variété de la faune des grandes profondeurs.

Ainsi, les animaux des divers ordres vivent dans les grandes profondeurs et paraissent s'accommoder parfaitement des pressions considérables qu'ils y trouvent.

Rien, dans leur aspect extérieur ni dans leur organisation, ne révèle que les

conditions auxquelles ils sont adaptés aient un retentissement sur leur morphologie ou leur physiologie. Parmi eux on trouve des représentants de familles et même de genres qui vivent près de la surface. L'observation se trouve donc parfaitement d'accord avec la théorie qui prévoyait le peu d'effet que devait avoir une si forte augmentation de pression sur les processus physiologiques des êtres qui y étaient soumis.

Cependant, si les résultats généraux confirmaient les prévisions théoriques, il restait bien des points de détail à éclaircir. Les animaux recueillis par des moyens souvent un peu brutaux ne vivaient que peu de temps dans les bacs où on les plaçait; enfin, il était de toute impossibilité de pénétrer dans les profondeurs où ils passaient leur existence pour juger *de visu* de leur manière de se comporter sous la pression formidable qu'ils supportaient. L'expérience devait donc venir vérifier et compléter l'observation, ainsi qu'il arrive toujours dans les sciences biologiques.

Mais avant de voir comment le problème a été résolu, précisons-le et énonçons-le nettement. Une question préalable se pose en effet. C'est la suivante. Lorsque, dans un des chapitres suivants, nous étudierons l'action sur les animaux aériens de la compression ou de la dépression, nous verrons que cela revient, d'une façon essentielle, à étudier l'action sur les mêmes animaux de l'air enrichi ou appauvri en oxygène. Y aurait-il quelque phénomène semblable agissant sur les êtres aquatiques soumis aux fortes pressions? En d'autres termes, l'eau des grandes profondeurs serait-elle plus riche en gaz dissous que l'eau de la surface?

Nous trouvons la réponse à cette question dans les travaux de Buchanan (Expédition du *Challenger*) et dans ceux de Tornoë (Expédition du *Vöringen*, 1880, p. 15).

Voici un tableau qui contient quelques chiffres donnés par Tornoë. Les volumes des gaz sont ramenés à 0° et à 760 millimètres.

Profondeur en mètres.	Volume d'oxygène par litre en cent. cubes.	Volume d'azote par litre en cent. cubes.	Proportion d'oxygène p. 100 (O + Az = 100).
0	6,1	11,3	35,1
0	7,3	12,9	36,1
0	6,5	12,1	34,9
0	7,8	14,1	35,6
183	7,0	13,4	34,2
413	6,3	13,8	31,1
549	7,0	14,7	32,2
960	5,6	11,7	32,6
1.134	7,1	12,8	35,8
1.573	6,9	14,6	32,0
2.341	7,5	13,8	35,1
2.829	6,9	14,6	32,0
3.173	7,0	14,6	32,2
3.219	6,7	12,9	34,0

L'acide carbonique ne figure pas dans ce tableau; c'est qu'en effet il ne paraît pas exister à l'état de simple dissolution dans la mer. Aussitôt formé, il s'unit aux carbonates neutres qu'il transforme en bicarbonates, les carbonates neutres étant, du reste, toujours présents en excès.

L'examen de ce tableau nous montre que les faibels variations de la teneur en azote et oxygène de l'eau de mer ne sont nullement en rapport avec la profondeur. Un animal placé à 4000 mètres de profondeur sera, au point de vue du chimisme de la respiration, dans les mêmes conditions qu'un animal de la surface (1).

En soumettant à des pressions croissantes et dans un vase complètement rempli de liquide les animaux sur lesquels on désire étudier les effets de cet accroissement de pression, on les mettra donc dans les mêmes conditions que si on les forçait à gagner des couches de plus en plus profondes de la mer.

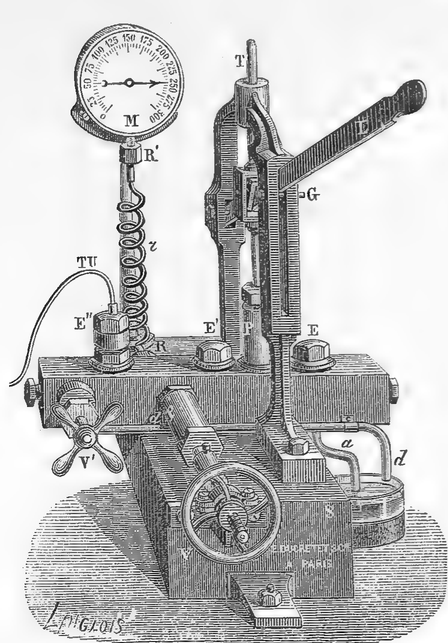


Fig. 562. — Presse hydraulique de Cailletet.

Voyons maintenant comment on a pu réaliser le problème ainsi posé.

Expériences de M. Regnard. — 1° Appareils et mode d'expérimentation. — Les pressions étaient obtenues au moyen de l'excellente presse hydraulique de Cailletet.

Elle se compose (fig. 562) d'un bâti en fonte S sur lequel repose un bloc de fonte percé dans lequel on peut injecter de l'eau au moyen du piston P qui est mû par le levier L. Le tube qui occupe le centre du bloc de fonte communique avec le tuyau *a* qui sert à aspirer l'eau lorsqu'on soulève le piston et avec le tube *d* lorsqu'on l'abaisse. Un robinet pointeau mû par la vis V′ permet de fermer le tuyau *d*; l'eau refoulée par le piston passe alors par le tube TU qui aboutit au bloc très résistant où on opère la compression. Lorsqu'on veut obtenir des pressions très élevées, sans avoir à craindre d'à-coup, on emploie le piston plongeur P′ qui est mû par le volant V. Un manomètre M indique à chaque moment la pression.



Fig. 563. — Tube de verre où sont renfermées les substances à comprimer.

Le bloc auquel aboutit le tube TU est fermé par un écrou sous lequel est placée une rondelle de cuir; il contient un tube de verre allongé T (fig. 563). Ce tube est fermé par un bouchon à l'émeri surmonté d'un tube capillaire

(1) Nous avons vu quel était le mécanisme qui empêchait l'eau de mer de s'enrichir en acide carbonique; si elle ne s'appauvrit pas non plus en oxygène, c'est grâce à la diffusion singulièrement accélérée par les remous de la surface, les courants marins et surtout la chute des poussières sur le fond.

qui permet aux minimes changements de volume, qui se produisent pendant la compression, de se transmettre à l'intérieur du tube T.

2° Expériences sur les ferments figurés. — On opère sur la levure de bière, *Saccharomyces cerevisiæ*. Le tube T est rempli d'une solution sucrée préalablement dosée, on additionne d'une certaine quantité de levure et on comprime immédiatement à 600 atmosphères. Au bout d'une heure, on décomprime et on retire le tube. Le liquide est limpide, la levure est rassemblée au fond et un nouveau dosage de la solution montre que le sucre n'a pas diminué. Ainsi, la levure a été incapable de se nourrir, de procéder à des échanges nutritifs comme elle l'eût fait dans la même solution à la pression

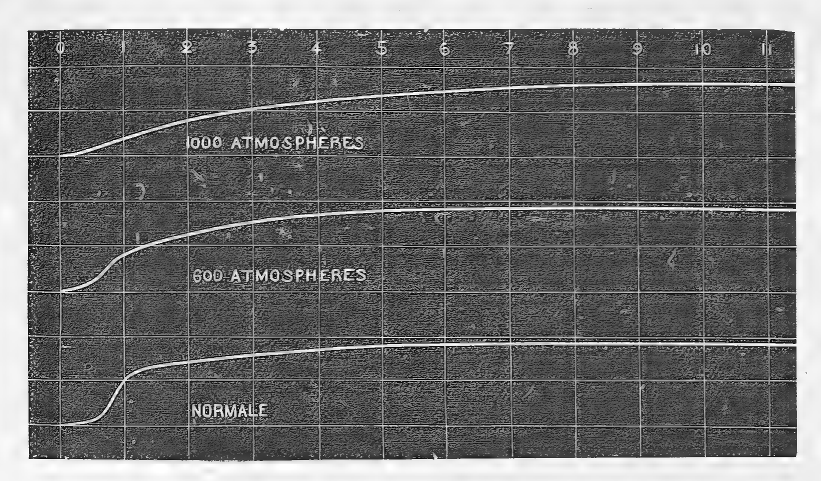


Fig. 564. — Courbes des fermentations produites par des levures normales ou soumises auparavant pendant une heure à des pressions de 600 et 1 000 atmosphères.

ordinaire, ainsi que le prouve un tube témoin placé dans le laboratoire à côté de l'appareil à compression.

Mais cette levure a-t-elle été tuée par cette pression subite de 600 atmosphères ? Non, car le tube retiré de l'appareil et abandonné dans le laboratoire présente peu à peu tous les phénomènes de la fermentation.

De même, la levure, d'abord comprimée dans l'eau pure à 1 000 atmosphères pendant une heure et placée au sortir de l'appareil dans la solution sucrée, ne fait pas fermenter la solution, elle est en état de vie ralentie ; mais peu à peu elle se réveille et la fermentation s'établit et s'achève.

Cette première expérience nous permet donc de conclure qu'une pression de 600 à 1 000 atmosphères fait tomber la cellule du *Saccharomyces cerevisiæ* en état de vie ralentie, d'où elle sort rapidement lorsqu'elle est soustraite à cette pression considérable ; mais cette expérience ne nous permet pas de connaître en détail le fonctionnement d'une levure ayant subi ces actions. Il faut pour cela avoir recours à la méthode graphique et faire usage d'un appareil compliqué que nous ne décrirons pas ici (1) ; nous reproduirons

(1) Voy. P. Regnard, *La Vie dans les eaux*, p. 144.

seulement les courbes produites par la fermentation elle-même. La courbe inférieure est produite par la fermentation de la levure normale : on voit que la fermentation s'établit rapidement. Pour la levure qui a subi pendant une heure une pression de 600 atmosphères, la fermentation s'établit plus lentement, la courbe du dégagement gazeux qui mesure l'intensité des échanges s'élève moins vite. Enfin, la courbe fournie par la levure qui a été laissée une heure à 1000 atmosphères montre que dans ce cas la fermentation subit un retard considérable ; elle ne s'établit que fort lentement et ne parvient pas à s'achever.

Les expériences faites avec le ferment lactique ont donné des résultats analogues. Du lait ensemencé de ferment lactique et soumis à une pression de 700 atmosphères pendant douze jours n'a subi aucune altération au bout de ce temps. Ce n'est qu'après quelques jours de séjour dans le laboratoire, au sortir de l'appareil, que, le ferment s'étant développé, le lait devient acide et que la caséine se précipite.

De même, l'urine, l'eau de levure, la viande, l'œuf (blanc et jaune mélangés) ensemencés avec des microorganismes de la putréfaction, et soumis à une pression de 700 atmosphères pendant une quinzaine de jours à la température de 18°, ne présentent aucune mauvaise odeur ni aucune trace d'altération; au contraire, des tubes témoins semblables aux précédents, ensemencés d'une façon identique et laissés dans le laboratoire à la température de 18°, se sont remplis de bactéries de la putréfaction et présentent une odeur épouvantable.

En présence de ces résultats, on peut se demander ce que deviennent les cadavres des animaux qui tombent au fond de la mer (1). Sont-ils préservés de la putréfaction par la pression à laquelle ils sont soumis ou existe-t-il à ces grandes profondeurs des bactéries adaptées à ces pressions et capables de s'y développer? C'est là une question qui n'est pas entièrement résolue, car si M. Certes, comme nous le verrons plus loin, a toujours obtenu des cultures en ensemençant des milieux nutritifs avec de la vase provenant des grandes profondeurs, les dragages de ces grands fonds n'ont jamais ramené de cadavres en putréfaction, mais seulement des animaux ramollis, des ptéropodes, par exemple, ramenés de 2000 mètres par la drague du *Travailleur*.

3° Expériences sur les protozoaires. — Au-dessous de 300 atmosphères, aucune action. A partir de 400, 600 atmosphères, les kolpodes, les paramécies sortent de l'appareil immobiles, les cils vibratiles sont gonflés ; les vorticelles ont le pédicule complètement déroulé et rigide comme s'il avait été forcé. Si la compression n'a duré que dix minutes environ, les animaux, après être restés quelque temps inertes, reprennent peu à peu leurs mouvements et paraissent ensuite ne se ressentir nullement de l'action qu'ils ont subie. Au contraire, si la compression a eu une durée plus longue, une heure, par exemple, les animaux succombent.

4° Expériences sur les cœlentérés, les échinodermes, les vers, les mollusques, etc. — Les actinies, les alcyons comprimés à 1000 atmosphères dans l'eau de mer, sortent de l'appareil inertes et ont *presque doublé de*

(1) A la vérité, ils sont presque toujours immédiatement dévorés par les nombreux poissons carnassiers qui habitent ces régions.

poids. C'est là un fait important que pouvait déjà faire prévoir l'augmentation de volume des cils vibratiles des Protozoaires. Si la compression n'a pas eu une durée trop prolongée, ces animaux reprennent encore peu à peu leur apparence et leur vie habituelle.

Résultats analogues avec les ascidies, les acéphales, les vers, imbibition des tissus par l'eau, augmentation de poids, hernie de l'estomac au dehors chez les astéries, puis retour progressif à l'état normal si la compression n a pas été de trop longue durée.

Les crustacés, protégés par leur carapace, résistent encore mieux et sont bientôt rétablis après un séjour de cinq minutes à 600 atmosphères.

5° Expériences sur les vertébrés inférieurs (poissons, batraciens). — Ici nous

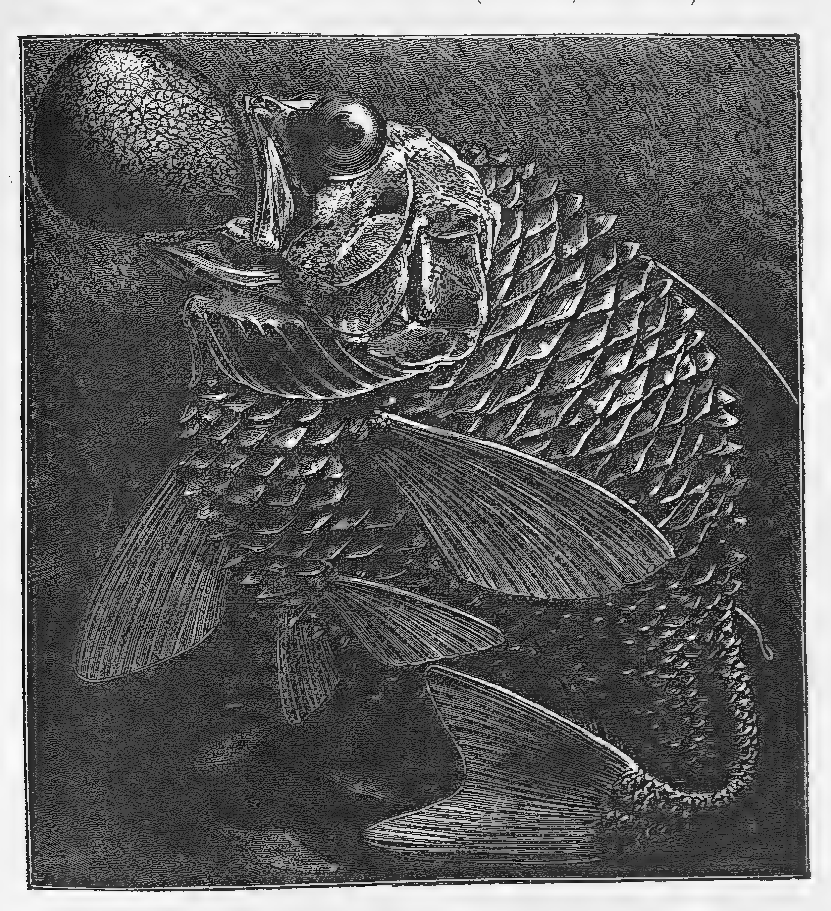


Fig. 565. — Poisson retiré brusquement des profondeurs : sa vessie natatoire fait hernie au dehors.

considérons des animaux beaucoup plus élevés en organisation que les précédents; leurs organes, composés de cellules très différenciées, vont se montrer beaucoup plus sensibles à l'augmentation de pression.

Dans toute expérience, il faudra d'abord éliminer le rôle de la vessie natatoire. Celle-ci est en effet remplie de gaz ; elle est ou complètement close ou en communication avec l'œsophage par un canal à lumière très étroite ; aussi lorsqu'un poisson est retiré brusquement des grandes profondeurs, les gaz contenus dans sa vessie natatoire, ne pouvant s'échapper au dehors, distendent celle-ci qui vient faire hernie à l'extérieur par la bouche. Pendant la compression d'un poisson vivant à faible profondeur, un phénomène inverse se passe : les gaz de la vessie fortement comprimés se dissolvent dans le sang ; lorsqu'ensuite l'animal est ramené à la pression ordinaire, ces gaz se dégagent en vertu de la loi de Dalton et produisent des embolies capillaires qui amènent sa mort instantanée.

Ayant donc vidé la vessie natatoire d'un poisson, d'un cyprin par exemple, en le mettant pendant quelques instants sous la cloche de la machine pneumatique, nous le soumettons à une compression progressive. Jusqu'à 100 atmosphères, le poisson sort de l'appareil aussi agile qu'il y était entré ; à 200 atmosphères, il sort légèrement engourdi ; à 300 atmosphères, il est mort ; à 400, il est gonflé, rigide, et on constate qu'il a sensiblement augmenté de poids. Le point critique se trouve donc aux environs de 300 atmosphères, ce qui correspond à une profondeur de 3000 mètres. Et il est à ce sujet fort remarquable de rapprocher de ce fait d'expérience cette observation que les poissons capturés par le filet au voisinage de la surface ne descendent jamais au delà de 2500 à 3000 mètres. Au-dessous de cette zone, la faune change complètement et ne se mélange jamais à la faune de surface.

La rigidité, l'augmentation de poids tiennent-elles bien à la pénétration de l'eau dans l'intimité des tissus ? L'expérience suivante le démontre avec certitude. On prépare deux trains postérieurs de grenouilles à la Galvani, l'un est enfermé dans un mince sac de caoutchouc complètement clos, l'autre laissé à nu. On les comprime tous deux à 600 atmosphères pendant un quart d'heure : celui qui n'est pas protégé sort gonflé, rigide, l'autre est flexible et n'a pas augmenté de poids, la mince enveloppe de caoutchouc l'a préservé, jouant le même rôle que la carapace de l'écrevisse ou du dytique que nous avons vus si bien résister aux fortes pressions.

6° Altérations histologiques. — D'ailleurs, en se livrant à l'examen histologique soigné des tissus soumis aux fortes pressions, il est facile de se rendre compte des altérations cellulaires produites. Les cellules caliciformes sont détruites, le noyau seul persiste entouré d'un peu de protoplasma.

Les cellules à cils vibratiles, les infusoires ciliés ont leurs cils épaissis, rigides. Les fibres musculaires striées ont une striation moins nette ; le sarcolemme est séparé de la fibre ; si la pression a duré longtemps, le faisceau primitif est dissocié. Dans les nerfs, les incisures sont accentuées, la membrane de Schwann est séparée de la myéline sous-jacente. Les globules sanguins, surtout ceux des vaisseaux superficiels, sont détruits.

7° Étude de l'influence de la pression sur certains phénomènes physiologiques. — Il était intéressant, à propos de cette étude, de posséder un appareil qui permît de suivre les effets de la pression pendant qu'elle se produisait.

L'appareil suivant répond à ce desideratum.

C'est un bloc d'acier très résistant, semblable à celui qui a été précédemment décrit, mais qui présente les modifications suivantes : l'écrou E qui ferme la partie supérieure est traversé par un cône à base inférieure de matière iso-

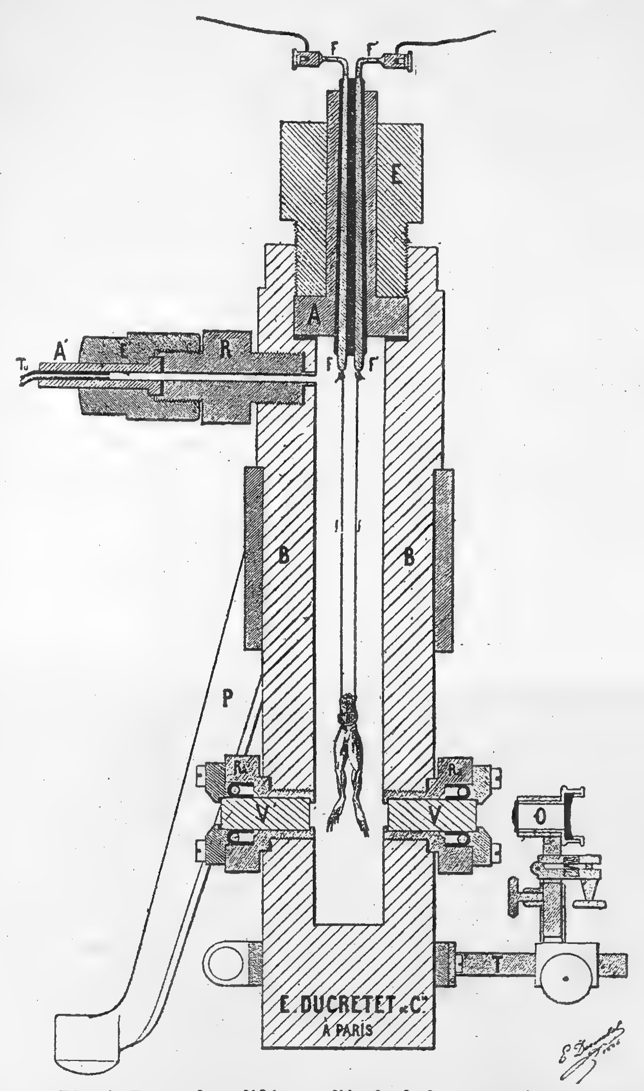


Fig. 566. — Bloc de Regnard modifié pour l'étude de la contraction musculaire sous haute pression.

lante (gutta-percha). Ce cône comprend à son intérieur et isole deux tiges de laiton FF, F′F′ qui se terminent à l'extérieur par deux bornes, et à l'intérieur du bloc par deux crochets qui supporteront les deux fils métalliques *f f′* auxquels on suspendra les organes sur lesquels on veut expérimenter. A la partie inférieure du bloc se voit la disposition qui permet à l'observateur de pouvoir

juger *de visu* des effets de la compression. Il fallut vaincre de grandes difficultés pour trouver un appareil transparent assez résistant et assez étanche pour supporter des pressions qui pouvaient atteindre 1 000 atmosphères.

Après de nombreux essais, M. Regnard y parvint par la disposition suivante: Deux cylindres de glace de Saint-Gobain V et V′ parfaitement homogènes et travaillés avec un soin particulier, ayant 90 millimètres de hauteur sur 15 de diamètre, sont enchâssés dans l'épaisseur d'un écrou R*a* et sont garnis à leur partie externe d'un cuir embouti (au-dessous de R*a*) qui assure une étanchéité parfaite.

Un objectif O, supporté par une articulation à genou et pouvant se déplacer le long de la tige T, recueille le faisceau de lumière électrique qui a pénétré par V′, traversé le bloc et qui est ressorti par V. On peut par ce moyen projeter sur un écran l'image de l'objet suspendu en face de VV′.

a. *Influence de la pression sur la contraction musculaire.*— Un arrière-train de grenouille préparé à la Galvani est suspendu par les nerfs lombaires aux fils *f f′*; l'appareil rempli d'eau est rapidement fermé par l'écrou E. Les fils F F′ sont reliés à un appareil d'induction.

A la pression ordinaire, une excitation produit une contraction énergique. A 100 atmosphères, pas de modification sensible. A 200 atmosphères, contraction beaucoup moins intense. A 300, contraction très faible, mais encore sensible. A 400, la contraction est tout à fait supprimée.

En étudiant, par les procédés habituels de la méthode graphique, la contraction de muscles de grenouille préalablement comprimés à des pressions croissantes pendant deux minutes, on obtient les courbes suivantes :

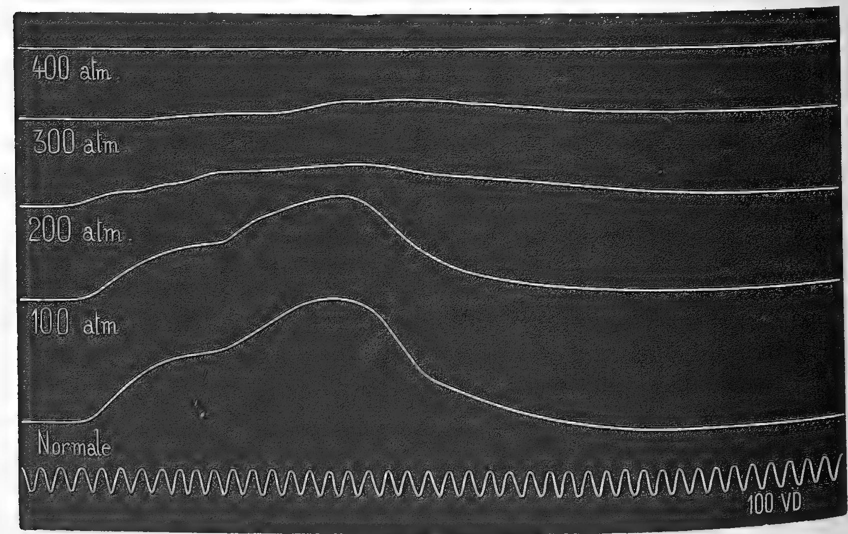


Fig.567. — Graphique des contractions de muscles de grenouilles préalablement comprimés sous de hautes pressions.

On voit qu'un muscle comprimé à 100 atmosphères donne une contraction qui ressemble beaucoup à celle du muscle normal. Après 200 atmosphères,

diminution de l'intensité, accroissement de la durée de la contraction. Après 300, accentuation de ces deux phénomènes. Enfin, après 400, suppression de toute contraction, le style du myographe trace une ligne droite.

Des expériences analogues ont montré qu'apres une compression de 300 atmosphères, le nombre des secousses nécessaires pour obtenir le tétanos physiologique était sensiblement diminué (13 secousses par seconde au lieu de 15 nécessaires pour un muscle normal).

Le *temps perdu* de la contraction musculaire croît également pour les muscles comprimés $\left(\frac{1}{100^e}\right.$ de seconde pour le muscle normal, $\frac{2}{100^e}$ après une pression de 100 atmosphères, $\frac{2,5}{100^e}$ après 200 et $\left.\frac{3}{100^e}\text{ après }300\right)$.

La compression d'un nerf diminue la vitesse de l'influx nerveux dans ce nerf.

b. *Circulation.* — Le cœur bien protégé dans le thorax souffre beaucoup moins que les muscles superficiels pendant la compression; il continue à battre, comme on peut s'en assurer en expérimentant sur de petites anguilles transparentes.

c. *Capacité respiratoire du sang.* — Ayant pris du sang de porc défibriné, on détermine sa capacité respiratoire; on la détermine de nouveau après avoir comprimé ce sang à 700 atmosphères. Elle a diminué et d'autant plus que la pression a duré plus longtemps.

d. *Phénomènes de développement.* — Des œufs de saumon comprimés pendant six heures à 200 atmosphères éclosent comme les œufs normaux. Après 300 atmosphères, le développement subit un léger retard. Enfin, il est supprimé à partir de 400 atmosphères.

La pression a moins d'influence sur le développement des végétaux; ainsi des graines de cresson alénois comprimées à 1 000 atmosphères ont germé, mais avec un certain retard, il est vrai, sur les graines normales.

e. *Assimilation chlorophyllienne.* — En comprimant des algues en présence du réactif de Schutzenberger (indigo blanc), on peut constater un dégagement d'oxygène révélé par le bleuissement du réactif à 100, 200..., 500 et même 600 atmosphères.

La fonction chlorophyllienne résiste donc à une pression considérable.

f. *Ferments solubles.* — Comme on devait s'y attendre, la pression n'a aucune influence sur eux. La salive, le suc gastrique, le suc pancréatique n'ont rien perdu de leur pouvoir après avoir subi une pression de 1 000 atmosphères.

Expériences de A. Certes. — Dans une première série d'expériences (1), A. Certes cultive à l'étuve des vases recueillies par les expéditions du *Travailleur* et du *Talisman* à des profondeurs variant de 500 mètres à 5 100 mètres, ainsi que de l'eau de mer recueillie dans des récipients stérilisés.

Toutes les cultures anaérobies restent stériles.

(1) Sur la culture à l'abri des germes atmosphériques des eaux et des sédiments rapportés par les expéditions du *Travailleur* et du *Talisman* (*C. R. Acad. des Sc.*, 1884, 98, p. 690).

Au contraire, presque toutes les cultures faites en présence d'oxygène se développent.

Il semble donc qu'on puisse en conclure que les bactéries qui sont adaptées aux énormes pressions qui existent dans les grands fonds se développent à la pression normale.

Dans une deuxième série d'expériences (1), le même auteur fait des cultures de microorganismes de la putréfaction dans de l'eau de mer additionnée d'infusion végétale. Il ensemence le liquide obtenu avec des bactéries de la putréfaction, puis il comprime à des pressions variant de 350 à 500 atmosphères. D'autres cultures faites dans les mêmes conditions sont laissées à la pression ordinaire.

Le développement des bactéries s'opère dans les flacons soumis à la pression (2), et aussi, naturellement, dans ceux qui sont laissés à l'air libre. Toutefois, ces derniers présentent une odeur nauséabonde qui n'existe pas dans les premiers.

Des infusoires, des rotifères, des tardigrades soumis pendant vingt-quatre, quarante-huit, soixante-donze heures à des pressions variant de 300 à 500 atmosphères sont retirés vivants.

Avec la collaboration de Roux, l'auteur étudie l'influence d'une pression de 600 atmosphères pendant vingt-quatre heures sur du sang charbonneux. Ce sang conserve toute sa virulence et donne des cultures normales.

Expériences de M. Roger (3). — M. Roger commence par répéter les expériences de M. Regnard avec quelques variantes. Il arrive à cette conclusion déjà énoncée que les bactéries supportent une pression de 1 000 atmosphères sans rien perdre de leur virulence ou de leur faculté de multiplication. Il emploie alors des pressions atteignant 3 000 kilogrammes par centimètre carré, soit 2 903 atmosphères. Les résultats obtenus varient avec les espèces employées et certaines conditions biologiques. C'est ainsi qu'après avoir supporté ces énormes pressions, le bacille du colon et le staphylocoque doré donnent des cultures aussi abondantes qu'avant la compression ; le staphylocoque a conservé son pouvoir chromogène.

Le streptocoque subit un retard dans son développement, et sa virulence diminue.

Les effets sur la bactéridie charbonneuse varient suivant qu'on s'adresse à des cultures sporulées ou asporogènes. Après une pression de 3 000 kilogrammes, le charbon sporulé pousse aussi bien qu'avant.

Au contraire, le charbon asporogène donne des colonies beaucoup moins abondantes ; il ne tue les animaux qu'en dix-huit ou dix-neuf jours, tandis qu'il amenait leur mort en trois ou quatre jours avant la compression.

(1) De l'action des hautes pressions sur les phénomènes de la putréfaction et sur la vitalité des microorganismes d'eau douce et d'eau de mer (*C. R. Acad. des Sc.*, 1884, 99, p. 385).

(2) Ces résultats ne sont d'ailleurs pas en contradiction avec ceux de P. Regnard, qui opérait à 700 atmosphères.

(3) H. Roger, Action des hautes pressions sur quelques bactéries (*Archives de physiologie normale et pathologique*, 1895, p. 12).

Mécanisme des modifications produites par la compression des tissus vivants.

Les expériences précitées de MM. Regnard, Certes, Roger aboutissent toutes à la même conclusion : lorsqu'on soumet des organismes à une pression croissante, il arrive un moment, variable d'un être à l'autre, où la pression a un effet nocif sur les tissus de l'animal considéré.

Il y a des protoplasmas adaptés à la pression d'une atmosphère ; il y en a d'autres, ceux des animaux des grands fonds, adaptés à des pressions de 700 ou 800 atmosphères, de même qu'il y a des protoplasmas adaptés à la température de 37° C. et d'autres adaptés à des températures de 75° C. et même à une température voisine de 100° C. (1). Il est même intéressant de remarquer à ce sujet que certaines formes (spores des bactéries) sont aussi bien adaptées à la résistance à la pression qu'à la résistance à une température élevée, à la dessiccation ou à l'oxydation.

Cherchons donc maintenant à voir ce qui se passe dans la cellule au moment où la limite de résistance à la compression est dépassée.

L'examen histologique des cellules déformées par la compression révèle que le protoplasma refoulé a quitté la paroi de la cellule, et qu'une certaine quantité d'eau a pénétré à l'intérieur de la cellule, supposition qui reçoit une confirmation par le fait de l'augmentation de poids des tissus comprimés. Or il semble bien, d'après les travaux récents sur la plasmolyse, qu'on puisse assimiler la couche ectoplasmique qui limite la périphérie de la cellule à une membrane semi-perméable qui laisserait passer l'eau et l'eau seulement, soit dans un sens, soit dans l'autre, et cela jusqu'à ce que la tension osmotique du suc cellulaire soit égale à celle du liquide qui environne la cellule.

Il s'agit donc de voir si l'énorme pression à laqnelle on soumet la cellule fait varier la tension osmotique et est la cause de la pénétration d'une certaine quantité d'eau à l'intérieur de la cellule. *A priori*, il semble que la réponse soit négative, mais une expérience était nécessaire; M. Regnard la réalisa par le dispositif suivant :

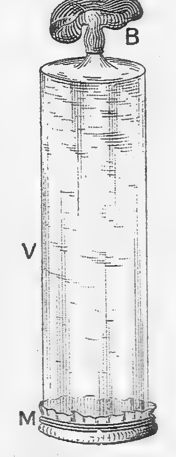


Fig. 568. — Osmomètre pour les hautes pressions.

Un vase cylindrique V est fermé à sa partie inférieure par une membrane de parchemin M, à sa partie supérieure par un ballon de caoutchouc B à moitié vide ; une solution de gomme remplit l'appareil. On possède ainsi deux vases exactement semblables qui pèsent le même poids. On plonge l'un d'eux dans l'eau distillée et on le laisse à la pression atmosphérique; on plonge l'autre dans la même eau distillée, puis, au moyen de la presse hydraulique, on le comprime à 400 atmosphères. Au bout de vingt-quatre heures, on retire les deux appareils et on constate qu'ils pèsent exactement le même poids. Ainsi, le phénomène d'osmose n'intervient pas dans la pénétra-

(1) Davenport et Castle, Acclimatation des animaux aux températures élevées (*Arch. Entw. Mech.*, II, 227-249).

tion de l'eau à l'intérieur de la cellule lors du phénomène de la compression.

Il semble donc que nous devions trouver l'explication du phénomène dans l'imbibition. En effet, pour le prouver, M. Regnard prend deux feuilles de gélatine exactement semblables et pesant le même poids ; il laisse séjourner l'une dans l'eau à la pression ordinaire, tandis que l'autre est soumise à une pression de 400 atmosphères. Au bout de quinze minutes, on pèse de nouveau les deux feuilles : celle qui n'a pas été comprimée pèse 4gr,60, l'autre 4gr,85. Mêmes résultats, mais encore plus accentués, obtenus avec des fragments de tige de *Laminaria digitata*. L'imbibition est donc bien le phénomène qui intervient pendant la compression pour amener les modifications que les expériences précédentes nous ont révélées.

Augmentation de pression de l'atmosphère gazeuse.

Comme le fait remarquer P. Bert (1), nous ne trouvons pas dans la nature de conditions dans lesquelles les êtres aériens aient à supporter une pression sensiblement différente de celle d'une atmosphère ; mais l'homme a créé pour les besoins de son industrie ces conditions anormales.

Les puits de mines nous offrent déjà un de ces exemples, mais même dans ceux qui s'avancent le plus profondément en terre, l'augmentation de pression n'atteint guère que quelques centimètres de mercure. Il est difficile de dire si les hommes soumis pendant de longues périodes à cette faible augmentation de pression en ressentent des effets physiologiques appréciables. Tant d'autres facteurs interviennent dans ce cas qu'il serait impossible de faire la part de l'augmentation de pression.

Mais ce phénomène et ses conséquences physiologiques se sont manifestées à l'homme avec une grande intensité dès qu'il a voulu pénétrer dans le milieu liquide, en emportant avec lui une provision d'air lui permettant un séjour un peu prolongé dans cet élément.

Nous allons d'abord passer rapidement en revue ces phénomènes très apparents. Nous en reprendrons ensuite l'analyse par les moyens dont les physiologistes disposent dans leurs laboratoires, et nous en trouverons en même temps l'explication.

Cloches à plongeurs. — C'est le premier appareil imaginé par l'homme pour pénétrer à l'intérieur de l'élément liquide. Il se compose d'une lourde cloche garnie à son intérieur de gradins sur lesquels s'installent les travailleurs. On laisse la cloche descendre dans l'eau ; à mesure que la cloche atteint une plus grande profondeur, l'eau monte à son intérieur, comprimant l'air qui s'y trouve ; et, d'après la loi de Mariotte, lorsque l'appareil aura atteint 10 mètres de profondeur, l'air sera réduit à la moitié du volume qu'il occupait primitivement et aura une force élastique double.

La cloche à plongeurs présente deux défauts très graves : le premier, c'est qu'il est impossible d'y travailler à sec ; le second, c'est que l'air de l'appareil est rapidement vicié par la respiration. Aussi cet appareil est-il maintenant complètement abandonné.

(1) P. Bert, *Pression barométrique*, p. 268.

Quant aux accidents auxquels il donne lieu, ce sont les mêmes que ceux que présentent l'appareil Triger ou les scaphandres, à la description desquels nous allons passer.

Appareil Triger. — Supposons qu'une cloche à plongeurs porte à sa partie supérieure une ouverture par laquelle on injecte de l'air, au moyen d'une pompe foulante ; la force élastique de cet air augmentant par le jeu de la pompe refoulera l'eau qui se sera élevée dans la cloche lors de la descente, il arrivera un moment où l'air sortira en barbotant sous les bords de la cloche et, si la cloche repose sur le fond, celui-ci se trouvera à sec : c'est le phénomène très simple qui se produit lorsqu'on souffle dans un tube immergé dans un liquide. Cette cloche ainsi modifiée est la partie essentielle de l'appareil Triger ; les deux défauts de la cloche à plongeurs sont donc éliminés du même coup. La pression de l'air qui remplit l'appareil et sort en bouillonnant sous les bords sera de 2 atmosphères lorsque ces bords seront à 10 mètres de la surface, à 3 atmosphères lorsqu'ils seront à 20 mètres, etc.

Dans la pratique, des perfectionnements sont apportés à cet appareil schématique. L'appareil n'a pas la forme d'une cloche, mais bien d'un cylindre coiffé à sa partie supérieure d'une pièce à trois compartiments (1), un médian et deux latéraux.

Le compartiment médian n'est que le prolongement du tube qui constitue la partie essentielle de l'appareil; c'est à son intérieur que la pompe refoule l'air.

Les deux compartiments latéraux communiquent par des portes qui peuvent se fermer d'une façon hermétique, d'une part avec l'extérieur, d'autre part avec le compartiment médian. Lorsqu'on veut pénétrer dans l'appareil, on entre dans un des compartiments latéraux, on ferme la porte de communication avec l'extérieur, on ouvre le robinet qui communique avec le compartiment médian ; lorsque la pression a atteint dans le compartiment latéral la valeur qu'elle a dans le compartiment médian, on peut pénétrer à l'intérieur de celui-ci et par conséquent de tout l'appareil. Une manœuvre inverse sert à sortir de l'appareil.

Ce perfectionnement a le grand avantage de permettre d'introduire ouvriers et matériaux dans l'appareil sans qu'il soit besoin d'interrompre le travail.

L'appareil Triger est fréquemment employé pour pénétrer à des profondeurs de 20 mètres, ce qui correspond à une pression d'air de 3 atmosphères à l'intérieur de l'appareil.

Une des plus fortes profondeurs atteintes le fut pendant la construction d'un pont jeté sur le Mississipi à Saint-Louis en 1869. La pression à l'intérieur de l'appareil pendant les crues s'éleva à $4^{atm},45$.

Plongeurs à scaphandre. — Comme l'appareil Triger, le scaphandre est un appareil qui, en dernière analyse, dérive de la cloche à plongeur.

Supposons, en effet, qu'un homme se couvre la tête d'une petite cloche à la partie supérieure de laquelle aboutisse un tuyau en communication avec une pompe foulante; cet homme respirant à l'intérieur de ce petit appareil Triger pourra pénétrer dans l'eau et y vivre à condition que le jeu de la pompe foulante maintienne constamment, à l'intérieur de la cloche, une pression

(1) Cette partie de l'appareil Triger a reçu le nom de *sass*.

suffisante pour que l'air sorte en barbotant sous les bords de la cloche.

Cette disposition très simple est le principe même du scaphandre.

On sait que celui-ci se compose d'un vêtement de caoutchouc recouvrant le corps et les membres.

Ce vêtement se raccorde au cou avec un casque métallique percé de hublots de verre qui permettent au scaphandrier de regarder à l'extérieur. Le tuyau de la pompe amène l'air non dans le casque lui-même, mais dans un réservoir placé sur le dos. Des soupapes fonctionnant automatiquement permettent à l'air de s'échapper dès qu'il a atteint la pression correspondant à la profondeur à laquelle le plongeur est parvenu.

Cet appareil est employé surtout pour la pêche des éponges et des huîtres perlières. On atteint couramment une profondeur de 20 mètres; dans les mers de l'Archipel, les pêcheurs descendent jusqu'à 48 mètres, ce qui correspond à $5^{atm},8$.

D'après Leroy de Méricourt, les plongeurs à scaphandres aux ordres des Compagnies anglaises ont même atteint la profondeur de 54 mètres, ce qui correspond à une pression de $6^{atm},4$ (1).

Voyons maintenant quels sont les effets de cette augmentation de pression déjà très sensibles sur l'organisme humain.

Les phénomènes observés sont différents et dans leur essence et dans leur intensité, suivant qu'on observe le plongeur pendant la phase de descente, c'est-à-dire de compression, ou pendant la phase d'ascension, c'est-à-dire de décompression.

1° Phénomènes dus a la compression. — Ils se manifestent pendant et à mesure que la cloche ou le scaphandre s'enfoncent dans l'eau, ou à mesure que l'air comprimé pénètre dans le caisson latéral s'il s'agit d'un appareil Triger.

Ils consistent surtout en *douleurs d'oreilles*. Elles sont dues au refoulement de la membrane du tympan vers l'intérieur de la caisse, refoulement qui est la conséquence de l'augmentation de pression de l'air ambiant. Elles cessent dès que, par des moyens appropriés (mouvements de déglutition, expiration forcée, la bouche et le nez étant fermés), on a rétabli la perméabilité de la trompe d'Eustache et qu'on a ainsi permis à l'air contenu dans la caisse de se mettre en équilibre de pression avec l'air extérieur.

On observe aussi des altérations de la voix, un nasonnement qui augmente avec la pression ; la voix hausse de ton ; l'acte de siffler devient impossible à partir de 3 atmosphères.

Tous ces phénomènes tiennent à l'augmentation de densité de l'air.

En ce qui concerne les fonctions respiratoires, les auteurs, notamment Bucquoy (2), signalent une diminution notable du nombre des mouvements respiratoires ; mais, par contre, leur amplitude est augmentée et les auteurs croient, mais sans en donner des preuves bien convaincantes, que la capacité respiratoire augmente, la pression de l'air comprimant les gaz intestinaux, diminuant leur volume et refoulant vers l'abdomen la base des poumons.

La circulation du sang est aussi influencée par l'augmentation de pression.

(1) P. Bert, *Pression barométrique*, p. 410.
(2) Bucquoy, Thèse de Strasbourg, 1861.

Le nombre des pulsations diminue, leur amplitude diminue également ; quant à la pression du sang, les auteurs ne sont pas d'accord sur le sens de la variation qu'elle éprouve.

Par contre, les auteurs sont unanimes à citer (surtout à l'occasion des accidents dont nous parlerons dans un instant) la rutilance tout à fait remarquable du sang veineux. La peau et les muqueuses pâlissent de plus en plus à mesure que la pression augmente.

Les expériences entreprises par les physiologistes nous donneront l'explication de ces phénomènes.

Quant aux fonctions de nutrition, aux phénomènes d'innervation et de sécrétion, les observations incomplètes et superficielles faites sur les plongeurs ne permettent guère de voir s'ils sont influencés par l'augmentation de pression.

2° Phénomènes dus a la décompression. — La fréquence, la gravité des accidents dépendent de la pression atteinte, du temps pendant lequel cette pression a été supportée, enfin et surtout de la rapidité de la décompression.

Si la pression n'a pas atteint 2 atmosphères, on n'observe pas d'accidents.

Après une pression variant de 2 à 3 atmosphères, c'est-à-dire après un séjour à une profondeur variant de 10 à 20 mètres, on observe fréquemment chez les scaphandriers ou les ouvriers tubistes des démangeaisons cutanées très vives auxquelles ils donnent le nom de « puces », ou même des tuméfactions musculaires, « moutons ». Les muscles qui présentent ces gonflements douloureux sont surtout ceux qui ont beaucoup travaillé. Souvent des douleurs péri-articulaires accompagnent ces accidents.

Lorsque la pression dépasse 3 atmosphères, on voit apparaître des accidents graves, fréquemment même mortels. Les travailleurs sont atteints de cécité, de surdité, de troubles de la locomotion et de la sensibilité générale. On observe surtout des paralysies des membres inférieurs, de la vessie, du rectum, des douleurs et des tuméfactions péri-articulaires. Les membres thoraciques sont bien plus rarement atteints. Quelquefois, au sortir de l'appareil (scaphandre ou caisson), le travailleur est pris d'une syncope, et la mort subite est souvent à redouter.

Ces accidents débutent fréquemment quelques minutes après la sortie des scaphandres ou des tubes ; mais quelquefois aussi, après quelques troubles moins graves, ils apparaissent au bout de vingt-quatre heures seulement.

Les troubles légers qui succèdent à une faible compression (puces, moutons) disparaissent d'ordinaire rapidement ; les troubles graves (altérations de la vue, de l'ouïe, paraplégie) peuvent aussi s'effacer sans laisser aucune trace, et, dans ce cas, ils s'amendent rapidement. S'ils persistent quelque temps, les fonctions abolies ne se rétablissent plus et le malade après avoir traîné une vie misérable pendant quelques mois, ou même quelques années finit par succomber.

On voit que les accidents dus à la décompression sont autrement graves que ceux qu'on observe pendant la phase de compression. Suivant l'expression imagée de deux auteurs qui se sont beaucoup occupés de cette question (Pol et Watelle), « on ne paie qu'en sortant ».

Quant à la cause de ces accidents, les médecins qui examinaient les

malades sans avoir recours à l'expérience ne pouvaient guère la découvrir. Il était réservé aux physiologistes d'indiquer le mécanisme intime d'après lequel tous ces troubles se produisent.

Cependant les auteurs anciens avaient déjà fait certaines remarques qui devaient mettre les expérimentateurs dans la bonne voie. C'est ainsi qu'ils avaient insisté à plusieurs reprises sur la rutilance du sang veineux, et qu'ils avaient observé ce fait singulier qu'un homme atteint d'accidents légers ou même d'accidents graves au début se trouvait subitement amélioré lorsqu'il était soumis à une nouvelle compression (1). Ils avaient vu aussi que les douleurs et le gonflement péri-articulaires cèdent par l'application de ventouses.

Enfin ils avaient un peu empiriquement formulé ce précepte important : « La décompression doit être *progressive* et *lente* ». La seule observation les avait conduits à ce résultat ; nous verrons comment l'expérimentation y conduit logiquement.

Étude expérimentale de l'augmentation de pression de l'atmosphère gazeuse. — Elle a été entreprise par Paul Bert au laboratoire de la Sorbonne. Toutes les expériences et les théories que l'auteur en a déduites ont été rassemblées en un volume (2), auquel nous emprunterons presque tout ce qui suit.

I. **Action de l'air comprimé. Faibles pressions** (1 à 5 atmosphères). — Elles ont été entreprises avec l'appareil du Dr Jourdanet. C'est une chambre métallique cylindrique qui mesure 2m,58 de hauteur et 1m,46 de diamètre. Elle est fermée par deux portes, l'une intérieure, l'autre extérieure, qui glissent sur des rainures. Les bords des portes sont garnis de coussins de caoutchouc que des boulons permettent d'appliquer fortement sur les bords de l'ouverture par laquelle on peut pénétrer dans le cylindre. La fermeture de l'appareil est ainsi rendue parfaitement étanche. Des hublots de verre permettent de voir ce qui se passe à l'intérieur de l'appareil qui est muni de thermomètres et de manomètres de précision. Un robinet peut être mis en communication avec une pompe à compression ; des robinets intérieurs et extérieurs sous la main de l'expérimentateur et de ses aides permettent de décomprimer de l'intérieur de l'appareil ou de l'extérieur en cas d'accident.

P. Bert étudia, sur lui-même et sur ses collaborateurs MM. Regnard et Jolyet, au moyen de cet appareil, les effets d'une pression ne dépassant pas 1 atmosphère. Le patient était soumis à un régime fixe et à un genre de vie parfaitement réglé. Ces expériences étaient complétées par d'autres faites sur les animaux et dans lesquelles la pression s'élevait jusqu'à 5 atmosphères.

Respiration. — Jusqu'à 1 atmosphère, le nombre moyen des respirations est le même dans l'air comprimé ou à la pression ordinaire.

La quantité d'air employée dans l'acte de la respiration était mesurée au moyen d'un compteur à gaz de précision. On respirait pendant dix minutes pour chaque expérience.

Les expériences montrèrent que la ventilation pulmonaire n'est pas sen-

(1) Bouhy, Creusement à travers les sables mouvants d'un puits de la mine de Strepy-Bracquegnies (*Ann. des trav. publ. de Belgique*, t. VII, 1848).
(2) P. Bert, *Pression barométrique*. Paris, Masson, 1878.

siblement modifiée sous l'influence de cette faible augmentation de pression.

Au contraire, en faisant des inspirations et des expirations forcées et employant toujours le compteur de précision, on put s'assurer que la capacité pulmonaire maxima subissait un accroissement appréciable. Pour P. Bert, elle passe de 3^{lit},75 à 3^{lit},99, soit une augmentation de 6,9 p. 100. Pour M. Regnard, l'augmentation atteint 11 p. 100.

Même résultat obtenu en opérant sur des animaux morts et mesurant leur capacité thoracique au moyen du procédé imaginé par M. Gréhant (1).

Cette augmentation de la capacité pulmonaire tient à la diminution de volume subie par les gaz intestinaux sous l'influence de l'accroissement de la pression et au refoulement vers la cavité abdominale de la base du poumon et du diaphragme.

A ces pressions comprises entre 1 et 5 atmosphères, on constate aussi nettement chez les animaux une diminution dans le nombre des inspirations.

On sait qu'au début de l'inspiration, la pression pulmonaire est inférieure à la pression atmosphérique, et que le contraire se passe au début de l'expiration; comme le dit P. Bert, « l'orifice glottique ne suffit pas au débit de la pompe respiratoire ». On s'était demandé ce que devenaient ces variations de la pression aérienne intra thoracique. Pravaz, à propos de l'explication des accidents observés sur les ouvriers tubistes, avait admis qu'elles étaient augmentées; P. Bert, au moyen d'un dispositif ingénieux (2), a établi qu'au contraire ces variations sont moindres qu'à la pression normale.

Circulation. — Sur l'homme, il a été impossible de mettre en évidence une variation sensible dans le nombre moyen des pulsations.

Sur les animaux, on a constaté que la pression du sang était augmentée dans l'air comprimé. Il semble difficile, au point de vue théorique, de donner l'explication de ce phénomène. P. Bert, ayant constaté que dans l'air enrichi en oxygène (contenant 35 p. 100 d'oxygène) la pression artérielle n'a pas varié, en conclut que l'augmentation de pression observée pendant la compression ne tient pas à l'action du sang suroxygéné sur le cœur ou le système nerveux, mais à la pression « en tant qu'agent d'ordre mécanique ».

Nutrition. Échanges respiratoires. — C'est une question importante qui a donné lieu à de nombreux travaux et sur laquelle P. Bert a peut-être passé un peu rapidement.

Regnault et Reiset (3) constatent que dans une atmosphère renfermant deux à trois fois plus d'oxygène que l'air normal l'absorption d'oxygène et l'exhalation d'acide carbonique dans un temps donné restent les mêmes.

P. Bert (4), sans citer les travaux de ses prédécesseurs, entreprend d'étudier la question au moyen de l'appareil de MM. Jolyet et Regnard, qui est un perfectionnement de celui de Regnault et Reiset. Mais ses expériences ne sont qu'au nombre de deux ; la première porte sur un rat, la seconde sur trois

(1) GRÉHANT, Recherches physiologiques sur la respiration de l'homme (*Journ. de l'anatomie et de la physiologie*, de Robin, 1re année, 1864, p. 524).
(2) P. BERT, *Pression barométrique*, p. 836.
(3) *Ann. de phys. et de chim.*, 5e série, t. XXVI, 1849.
(4) P. BERT, *Pression barométrique*, p. 829.

grenouilles. L'auteur arrive à cette conclusion inattendue *à priori* que l'activité des échanges gazeux augmente d'abord avec la pression, passe par un maximum qui correspondrait à peu près à une pression de $2^{atm},5$ et décroît ensuite lorsque la pression continue à augmenter.

L'auteur ne donne d'ailleurs aucune indication sur la nourriture que recevait le rat pendant les différentes phases de l'expérience, non plus que sur les variations de température qui ont pu aussi se produire au cours de ces expériences.

La question fut reprise en 1884 par M. de Saint-Martin (1) au moyen d'un appareil fondé aussi sur le même principe que celui de Regnault et Reiset.

Les animaux employés ont été le cobaye (11 expériences) et le rat (5 expériences). Le cobaye restait six heures à jeun dans l'appareil, le rat recevait une quantité déterminée de pain. La teneur en oxygène a varié de 21 p. 100 à 75 p. 100, ce qui correspondrait à une variation de pression de 1 à $3^{atm},6$. (On admet en effet dans toutes ces expériences qu'enrichissement de l'atmosphère en oxygène ou augmentation de pression produisent les mêmes effets physiologiques.)

L'auteur s'est soumis lui-même, en respirant l'air d'un gazomètre au moyen d'une soupape Denayrouse, à des inhalations d'un air contenant jusqu'à 95 p. 100 d'oxygène (ce qui correspond à une pression de $4^{atm},15$).

Chaque expérience durait quinze minutes.

Les expériences sur les cobayes, les rats, aussi bien que celles sur l'homme, établirent d'une façon très nette que la suroxygénation de l'atmosphère, ou, ce qui revient au même, l'augmentation de pression, n'apportent aucun changement appréciable dans les phénomènes chimiques de la respiration.

Les conclusions de l'auteur ont d'ailleurs été confirmées par les recherches postérieures de Lukjanow (2), Kempner (3) sur les cobayes, chiens, chats, oiseaux, lapins, et par celles de Léon Fredericq (4) sur l'homme.

L'influence de l'augmentation de pression sur les phénomènes de désassimilation azotée a été aussi examinée par P. Bert. Sur l'homme, il a vu la quantité d'urée augmenter de $24^{gr},72$ à $26^{gr},04$.

Sur le chien, variation dans le même sens : on passe de $8^{gr},1$ à $9^{gr},5$ d'urée en vingt-quatre heures lorsque la pression croît de 1 à 3 atmosphères. Mais il est difficile de tirer une conclusion ferme de ces dernières expériences, qui sont peu nombreuses, d'autant plus que, pour le chien, l'augmentation dans l'élimination d'urée persista après le retour de l'animal à la pression normale.

II. **Action de l'air comprimé. Fortes pressions.** — Nous venons de voir que les animaux passant de la pression normale à une pression de quelques atmosphères, et revenant ensuite progressivement à la pression ordinaire, ne présentaient que des troubles peu accusés qu'une

(1) *Recherches expérimentales sur la respiration*. Paris, Octave Doin, 1893.

(2) Lukjanow, Ueber die Aufnahme von Sauerstoff bei erhöhtem Procentge halt desselben in der Luft (*Zeitschr. für physiol. Chem.*, Bd VII, 1884).

(3) Kempner, Neue Versuche über den Einfluss des Sauerstoffge haltes der Einathmungs Luft auf den Ablauf des Oxydationsprocesse im thierischen Organismus (*Archiv für Anat. u. Phys.*, p. 396, 1884).

(4) Livre jubilaire publié par la Société de médecine de Gand, 1884.

analyse physiologique délicate pouvait seule mettre en évidence. Les fonctions de nutrition ne semblent pas atteintes et, si la faible compression n'a pas duré trop longtemps, les animaux qui y étaient soumis reprennent leur vie habituelle dès qu'ils sont revenus à la pression normale.

Au contraire, lorsqu'on soumet les animaux, et particulièrement les mammifères, à des pressions supérieures à 5 atmosphères, ils présentent des accidents d'une intensité souvent effrayante. Ces phénomènes sont variés ; nous les énumérerons et étudierons en détail ; mais deux d'entre eux priment tous les autres et dominent la scène, ce sont : d'une part, des accidents paralytiques ; d'autre part, des accidents tétaniques. Examinons-les séparément, car, s'ils coexistent souvent chez un même animal, ils relèvent de causes tout à fait différentes.

A. *Paralysies.* — Enfermons un animal, un chien, par exemple, dans un cylindre résistant (1) et, au moyen d'une pompe de compression, refoulons de l'air dans le cylindre jusqu'à une pression de 8 atmosphères ; laissons l'animal sous cette pression pendant quelques minutes, puis ouvrons brusquement un large robinet qui permettra à l'air comprimé de s'échapper au dehors et à la pression intérieure du cylindre de retomber d'un seul coup à la pression normale. Nous voyons, dans la majorité des cas, l'animal sauter au dehors joyeusement dès que la liberté lui est rendue ; mais bientôt une inquiétude le saisit, il manifeste qu'il éprouve des démangeaisons, des douleurs dans les membres postérieurs ; bientôt une des pattes postérieures se paralyse, quelquefois les deux, l'impotence de tout le train postérieur de l'animal va en s'accentuant, et, peu à peu, aboutit à la paraplégie avec son cortège habituel de symptômes du côté de la vessie et du rectum.

Rien d'ailleurs de plus variable que le moment d'apparition, l'intensité, la durée, le mode de terminaison de ces accidents. Aucune règle fixe ne se dégage des très nombreuses expériences, variées sous tous les rapports, entreprises à ce sujet par P. Bert (2) et MM. Blanchard et Regnard (3). L'intensité de la pression atteinte, la durée de la compression, le retour plus ou moins brusque à la pression normale, sont les principaux facteurs qui tiennent sous leur dépendance la gravité des accidents observés.

Les oiseaux paraissent beaucoup mieux que les mammifères supporter une pression qui peut aller jusqu'à 10 atmosphères avec retour brusque à la pression normale.

Les mammifères présentent des accidents graves à partir de 6 atmosphères ; cependant, à cette pression, une forte proportion des animaux comprimés ne présente encore aucun accident ; au contraire, à partir de 8 atmosphères, bien peu y échappent et presque tous succombent ; enfin, à partir de 9 atmosphères, aucun animal n'a survécu. Mais il y a parmi les animaux d'une même espèce, soumis à la même pression, des différences individuelles curieuses et difficilement compréhensibles. Il arrive même qu'un animal, après avoir sup-

(1) Cet appareil sera décrit avec détails à propos d'expériences ultérieures.

(2) P. Bert, *Pression barométrique*, 2e partie, chap. VII.

(3) Blanchard et Regnard, Sur les lésions de la moelle épinière dans la maladie des plongeurs (*Comptes rendus de la Soc. de biologie*, 1881, p. 253).

porté une pression très forte de 8 atmosphères, par exemple, à plusieurs reprises, suivie de décompressions brusques, meurt subitement quelque temps après à la suite d'une pression inférieure.

Ces accidents, par leur nature, par la variété qu'ils présentent chez les différents individus et aussi chez le même individu à deux époques différentes, font immédiatement songer aux accidents observés chez les ouvriers tubistes et les scaphandriers. Dus à des causes physiques identiques, il n'est pas douteux qu'ils soient le résultat des mêmes lésions que va nous faire connaître l'examen attentif des animaux frappés.

D'après les troubles observés, l'attention des expérimentateurs devait se porter, à l'autopsie des animaux, sur la moelle épinière. Il ne fut pas difficile, en effet, d'y découvrir des altérations souvent considérables. Elles consistaient en un ramollissement se produisant très rapidement et progressant si vite qu'en moins de vingt-quatre heures il arrivait quelquefois qu'on trouvait la moelle « fluide comme de la crème ».

Ces lésions de la moelle ont été étudiées histologiquement avec soin, dans un cas, par MM. Regnard et Blanchard (1). Ils se sont adressés à un chien qui, après avoir présenté une paralysie complète du train postérieur à la suite d'un séjour dans l'air comprimé à la pression de $7^{atm},5$, s'était progressivement rétabli et avait recouvré presque intégralement l'usage de ses membres postérieurs. L'animal fut sacrifié par piqûre du bulbe et sa moelle débitée en coupes. A l'œil nu, la moelle ne présentait aucune altération manifeste, mais au microscope on pouvait constater des lésions accentuées qui occupaient presque toute la hauteur de l'axe médullaire. Ces lésions consistaient essentiellement en foyers hémorragiques accompagnés de myélite parenchymateuse aiguë. On ne remarquait aucune trace de sclérose.

Les foyers hémorragiques occupaient seulement la substance grise et s'étendaient sur presque toute la hauteur de l'axe gris; on les rencontrait aussi bien dans les cornes antérieures et postérieures que dans la commissure. La myélite parenchymateuse était caractérisée, comme d'ordinaire, par une hypertrophie des cylindraxes qui étaient devenus variqueux ou même avaient complètement disparu. Il en résultait, dans la substance blanche et particulièrement à la région dorsale, de larges lacunes. Quant aux cellules nerveuses, intactes dans les points où n'existaient pas des lésions de myélite, elles avaient subi au voisinage des points altérés une atrophie considérable, leurs prolongements étaient moins nombreux et leurs noyaux semblaient plus ou moins obscurs. Il est remarquable qu'avec des lésions aussi étendues et aussi graves, l'animal ne présentât pas de troubles physiologiques plus considérables de la motilité. L'examen histologique soigné de la moelle d'un animal examinée au moment où il présentait des troubles graves paraît n'avoir jamais été pratiqué. Il est probable qu'on trouverait des lésions analogues à celles que nous venons de décrire, mais peut-être encore plus accentuées.

Il nous faut maintenant examiner par quel mécanisme se produisent ces lésions.

(1) *Loc. cit.*

M. Bouchard (1) avait proposé l'explication suivante : pendant la compression, les gaz intestinaux diminuent de volume, la paroi abdominale est refoulée vers la colonne vertébrale, et les choses, en effet, se passent bien ainsi; les ouvriers tubistes le savent par expérience et connaissent l'utilité de resserrer la boucle de leur pantalon en pénétrant dans les appareils. Mais la paroi abdominale ainsi violentée tend, en vertu de son élasticité, à reprendre sa forme primitive, et opère une succion qui amène la congestion des organes abdominaux et l'anémie des organes éloignés, des muqueuses, par exemple, qui en effet pâlissent pendant cette phase de compression.

Au moment de la décompression, les gaz du tube digestif reprennent brusquement leur volume antérieur et refoulent vers la périphérie le sang qui s'était accumulé dans les organes abdominaux, d'où congestions et hémorragies consécutives qui se manifestent sous la forme d'épistaxis, d'hémoptysies, accompagnées d'hémiplégies et de paraplégies fugaces ou persistantes.

C'est là une théorie ingénieuse qui rend bien compte de certains faits; mais si ce mécanisme a une part dans les accidents provoqués, il ne saurait les produire ni les expliquer tous.

Il est difficile en effet, comme le fait remarquer P. Bert, d'admettre qu'une masse de gaz, contenue dans un tube duquel elle peut facilement s'échapper aux deux extrémités, acquiert une force élastique capable de chasser une masse de sang assez violemment pour qu'elle aille provoquer des hémorragies dans les organes périphériques ; d'ailleurs, la congestion supposée de ces organes n'existe pas en fait. Nous avons rencontré, il est vrai, des hémorragies dans la moelle, mais ce sont des accidents locaux, des lésions capillaires qui ne résultent pas d'une congestion généralisée de l'organe. D'ailleurs, M. Bouchard sent lui-même l'insuffisance de sa théorie et invoque, pour expliquer certains accidents, les idées de Rameaux et Bucquoy (2) sur le rôle des gaz du sang. Ces auteurs, le second en particulier, disons-le, ont pressenti la véritable cause des accidents consécutifs au séjour dans l'air comprimé; malheureusement, leur théorie n'était pas appuyée de preuves expérimentales entraînant la conviction, mais elle reçut une éclatante confirmation lors des expériences de P. Bert et de MM. Regnard et Blanchard.

Les animaux qui séjournent dans l'air comprimé, dit M. Bucquoy, introduisent continuellement dans leur poumon cet air dont les éléments : oxygène, azote, acide carbonique, doivent s'y dissoudre proportionnellement à la loi de Dalton. La teneur du sang en gaz dissous va donc augmenter considérablement pendant cette phase de compression; vienne ensuite une brusque décompression, d'après la loi physique à l'instant invoquée, ces gaz redeviendront libres et se présenteront au milieu du liquide sanguin sous forme de bulles qui viendront obstruer les capillaires, et provoquer les hémorragies observées, suivies du ramollissement des organes, particulièrement du tissu nerveux. Le liquide qui imbibe les tissus, la lymphe, abandonnera, comme le sang, des gaz libres au moment de la décompression, et ces gaz, se collectant dans le tissu cellulaire, produiront ces tuméfactions musculaires, périarticu-

(1) Bouchard, *De la pathogénie des hémorragies*. Paris, 1869.
(2) Bucquoy, *De l'air comprimé*, 1861.

laires, ces emphysèmes si fréquemment observés chez les ouvriers que leur profession expose à ces accidents.

M. Bucquoy cite à l'appui de sa théorie une observation singulièrement suggestive que nous reproduisons :

« Un jour que j'observais un ouvrier souffrant cruellement à un genou, j'ai vu les ventouses sèches placées autour de l'articulation tomber les unes après les autres, quoique bien appliquées par l'infirmier, homme très adroit. Elles furent replacées plusieurs fois et ne tinrent qu'au bout d'un certain temps ; le malade se trouva alors notablement soulagé. L'élimination des gaz explique à la fois et la chute des premières ventouses et la prompte disparition du mal par leur application répétée. »

Certains faits observés au cours des expériences de P. Bert venaient d'autre part apporter une nouvelle confirmation aux idées de M. Bucquoy.

C'est ainsi que, comme nous l'avons vu déjà, les accidents consécutifs au séjour dans l'air comprimé se montraient d'autant plus fréquents et d'autant plus graves que la compression avait été poussée plus loin, qu'elle avait duré plus longtemps et que la décompression avait été plus brusque, toutes remarques qui s'accordent bien avec l'hypothèse physico-mécanique proposée par M. Bucquoy. Et d'ailleurs, l'autopsie des animaux ayant succombé aux accidents qui nous occupent montre avec la dernière évidence la présence de gaz libres dans le système circulatoire. Lorsque l'animal a été soumis à une forte pression, 10 atmosphères par exemple, ces gaz existent partout, aussi bien dans les veines que dans les artères et le cœur. Au moment de la décompression, l'animal semble mousser. Quand l'animal est en état de gestation, on trouve même ces gaz libres dans les vaisseaux du placenta et des fœtus. Ils se collectent en particulier en grande abondance dans le cœur, et P. Bert a pu en recueillir 33 centimètres cubes dans les cavités droites de cet organe chez un chat. Il a pu ainsi à maintes reprises faire l'analyse de ces gaz, et il a constaté qu'ils étaient composés presque uniquement d'azote accompagné d'une faible proportion d'acide carbonique et même quelquefois d'un peu d'oxygène.

Si on se rappelle l'état dans lequel ces gaz existent dans le sang et leur rôle physiologique, on comprend *à priori* que les résultats doivent bien être ceux qu'indique l'analyse. Lorsqu'on procède, d'après un mode opératoire qui sera ultérieurement décrit, à l'analyse des gaz du sang d'un animal soumis à une pression supérieure à 1 atmosphère, on trouve que l'oxygène augmente dans le sang à mesure que la pression s'élève ; mais cette augmentation qui suit à peu près la loi de Dalton est peu considérable et atteint seulement en moyenne 12 à 15 p. 100 de la quantité du même gaz contenu dans le sang à la pression normale. D'autre part, en admettant qu'une petite quantité d'oxygène se dégage au moment de la décompression, les embolies gazeuses ainsi produites disparaîtraient rapidement, ce gaz étant rapidement utilisé par les tissus environnants pour entretenir les combustions de l'organisme. D'ailleurs, l'expérience a montré à Nysten (1) qu'on pouvait impunément injecter dans l'appareil circulatoire de grandes quantités d'oxygène

(1) *Recherches de physiologie et de chimie physiologique.* Paris, 1811, p. 53 et 81, cité par P. Bert.

sans provoquer de troubles sérieux chez les animaux soumis à l'expérience.

Quant à la proportion d'acide carbonique, l'expérience nous montrera que, loin d'augmenter dans le sang des animaux comprimés, elle a plutôt tendance à diminuer. Les recherches de Nysten déjà citées lui ont montré d'autre part que l'acide carbonique introduit aussi en grandes quantités dans le sang en disparaît rapidement; il est probable en effet qu'il passe à l'état de bicarbonates et est éliminé au niveau du poumon.

Il n'en va plus de même de l'azote dont la proportion dans l'air atmosphérique est considérable et qui, augmentant dans le sang proportionnellement à la pression, arrive à présenter à 10 atmosphères une augmentation qui dépasse 400 p. 100. C'est ainsi que, dans une expérience de P. Bert, la quantité d'azote, qui était de 1^{cm^3},8 dans 100 centimètres cubes de sang à la pression normale, passe à 9^{cm^3},8 à la pression de 10 atmosphères. Il en résulte qu'en retombant brusquement de la pression de 10 atmosphères à la pression normale, il devra se dégager à peu près 8 centimètres cubes d'azote par 100 centimètres cubes de sang; cela produit, comme le fait remarquer P. Bert, pour un chien de 14 kilogrammes qui contient 1 kilogramme de sang, à peu près 80 centimètres cubes d'azote qui se trouve à l'état gazeux dans l'appareil circulatoire. D'autre part, le sang d'un animal normal respirant à la pression ordinaire est saturé d'azote (1); il en résulte que ce gaz devenu libre et formant des embolies ne se dissoudra que bien lentement dans le sang qui le baigne et ne pourra gagner que bien difficilement le poumon au niveau duquel il a d'ailleurs peu de tendance à s'éliminer.

Ces faits nous expliquent donc et l'intensité des accidents observés, et leur persistance entraînant leur gravité. Ils nous expliquent également comment des animaux soumis à une forte pression, mais dans une atmosphère pauvre en azote et riche en oxygène, ne présentent pas de gaz libres dans leur sang au moment de la décompression. Enfin, ils nous suggèrent la prophylaxie de la décompression et le traitement des accidents signalés.

Il résulte, en effet, des observations que nous venons de rapporter, qu'il y a grand avantage à opérer la décompression d'une façon progressive; on évite avec presque certitude l'apparition des accidents graves en réglant la décompression à raison de dix minutes par atmosphère. L'azote ne se dégage dans ces conditions qu'à l'état de bulles très fines qui peuvent traverser les capillaires sans provoquer d'embolies et qui sont peu à peu éliminées au niveau du poumon.

Ce précepte avait déjà du reste été nettement formulé par les médecins qui avaient eu à soigner les ouvriers travaillant dans les appareils Triger; malheureusement, il est difficile d'obtenir de ceux-ci qu'ils se soumettent à ces prescriptions; ils en comprennent mal l'importance et surtout ils ont hâte de sortir d'un appareil dans lequel la détente de l'air produit un abaissement très notable de la température.

Les accidents ayant éclaté, la connaissance du mécanisme qui les produit nous suggère deux moyens de les combattre. Le premier consiste à faire

(1) Il en contient même plus que ne l'indique la loi de Dalton. Ce fait tient, d'après les recherches de Setschenow et celles de Jolyet et Sigalas, à la présence des globules rouges autour desquels l'azote se condenserait, ainsi que le suppose Merget.

respirer au patient de l'oxygène pur ou de l'air dans lequel l'azote aura été remplacé par de l'hydrogène. On activera ainsi l'élimination de l'azote au niveau du poumon et, de fait, dans les expériences de P. Bert, ce moyen s'est surtout montré efficace pour hâter l'élimination du gaz collecté dans les cavités droites du cœur.

Le second moyen consiste dans la recompression qui oblige les gaz libres à repasser en solution, d'où disparition des embolies et rétablissement du cours du sang interrompu.

Une décompression progressive permet alors le retour à la pression normale sans crainte de voir réapparaître les accidents. Dans beaucoup de cas, il sera d'ailleurs avantageux de combiner ces deux moyens.

En résumé, nous voyons que les accidents amenés par le séjour dans l'air comprimé et qui se manifestent au moment du retour brusque à la pression normale sont d'ordre physico-mécanique et qu'ils sont justiciables de procédés de même nature.

B. *Accidents tétaniques.* — Les phénomènes que nous venons d'étudier étaient dus à la présence de l'azote dans l'air comprimé; ceux dont nous allons nous occuper se produisent sous l'influence d'une véritable intoxication par l'oxygène à haute tension sur les éléments anatomiques. Il était nécessaire de consigner ce résultat au début de notre exposé, car il explique le mode opératoire adopté par P. Bert dans les expériences instituées à ce sujet.

Il s'agit en effet d'étudier l'action de l'oxygène à haute tension sur les éléments anatomiques en éliminant les effets dus à la présence de l'azote qui viendraient troubler et compliquer les premiers. On y parvient en faisant respirer à l'animal soumis aux expériences de l'oxygène pur ou tout au moins de l'air additionné d'une forte proportion d'oxygène sous une pression plus ou moins considérable. Ce procédé des atmosphères suroxygénées a encore l'avantage de permettre d'obtenir avec une pression relativement faible les effets qu'on n'obtiendrait qu'avec des pressions si considérables que les appareils employés n'y pourraient résister. L'exemple suivant va nous permettre de nous expliquer.

Supposons que nous préparions un mélange d'air et d'oxygène contenant 81 p. 100 d'oxygène et que nous le comprimions à 6 atmosphères, et voyons à quelle pression il faudrait comprimer de l'air ordinaire pour que l'oxygène dans l'un et l'autre cas produise les mêmes effets?

La proportion de l'oxygène dans l'air atmosphérique est de 20,9 p. 100. C'est ce que P. Bert appelle sa *tension*. Dans le mélange à 81 p. 100 d'oxygène comprimé à 6 atmosphères, la tension de l'oxygène sera de $81 \times 6 = 486$. Il faudrait donc, pour obtenir les mêmes effets avec l'air ordinaire, le comprimer à $\frac{486}{20,9} = 23^{\text{atm}},2$.

Analysons maintenant [les troubles provoqués chez les animaux de différentes classes par l'oxygène sous forte tension.

1° *Oiseaux et grenouilles.* — Les convulsions chez les oiseaux commencent à apparaître avec une tension d'oxygène de 300, ce qui correspond à une pression de 15 atmosphères dans l'air ordinaire. Les troubles que nous

allons décrire commencent cependant déjà à se manifester à une pression inférieure. Au bout de quelque temps de séjour dans l'oxygène, à la tension indiquée, les oiseaux ont le corps secoué par un tremblement suivi bientôt de secousses et de convulsions. Ces accidents se calment pendant quelques instants, mais ne tardent pas à reparaître. Ces convulsions rappellent celles qu'on observe dans l'empoisonnement par la strychnine; comme ces dernières, elles sont provocables par une excitation. Elles persistent même après que l'oiseau a été ramené à l'air ordinaire et la mort survient souvent même dans ce dernier cas. La sensibilité et l'intelligence paraissent intactes: l'oiseau suit la main qui cherche à le saisir, il ferme les paupières lorsqu'on approche un objet de son œil; la locomotion est profondément troublée; il était rare que les moineaux soumis à ces expériences parvinssent à se tenir sur leurs pattes, et il leur était en tous cas impossible de voler. Un fait important sur lequel nous reviendrons est que la température centrale est fortement abaissée. Presque tous les oiseaux intoxiqués par l'oxygène sous forte tension présentaient une lésion remarquable qui consistait en suffusions sanguines, c'est-à-dire en hémorragies du diploé.

En opérant sur des grenouilles, P. Bert a pu analyser les phénomènes précédents plus en détail: il a pu démontrer que l'action toxique de l'oxygène comprimé portait surtout sur la moelle épinière. Il a vu en effet que le cœur, les muscles, les nerfs moteurs ne semblent pas touchés par le poison; ils répondent parfaitement aux excitations, mais les actes réflexes sont atténués ou même supprimés après avoir été considérablement exagérés. On suspend les convulsions dans un membre en coupant son nerf moteur.

Les anesthésiques empêchent les convulsions de se produire ou les font cesser si elles ont débuté; ainsi des animaux placés dans de l'oxygène comprimé avec du chloroforme ou de l'éther meurent sans que les contractions tétaniques se soient manifestées. Enfin, fait intéressant et qui nous mettra sur la voie du mécanisme intime de l'intoxication, les animaux saignés résistent mieux que les autres.

2° *Mammifères* (chiens). — Les convulsions n'apparaissent qu'à des pressions supérieures à celles qui les provoquent chez les oiseaux; il faut en effet ordinairement arriver à 19 atmosphères pour les voir se manifester; on les voit cependant se produire également à une pression inférieure, mais continuée pendant longtemps.

Nous empruntons la description de l'attaque à P. Bert (1) : « Lorsqu'on retire l'animal de l'appareil, il est généralement en pleine convulsion tonique; les quatre pattes sont roides; le tronc est recourbé en arrière ou un peu sur le côté, les yeux sont saillants, la pupille dilatée, les mâchoires serrées. L'examen ophtalmoscopique montre une forte injection du fond de l'œil. Bientôt survient une sorte de relâchement auquel succède une nouvelle crise de roideurs avec convulsions cloniques ressemblant à la fois à la crise strychnique et à une attaque de tétanos. Ces crises, pendant les intervalles desquelles le chien ne se relâche pas complètement, mais reste en opisthotonos,

(1) P. Bert, *Pression barométrique*, p. 799.

respirant avec une grande difficulté, suspendent la respiration, le cœur continuant toujours à battre, quoique souvent avec une étonnante lenteur ; la pression artérielle s'abaisse considérablement. La sensibilité reste conservée, et l'on peut, en la mettant en jeu, exciter de nouvelles convulsions. Après quelque temps, ces périodes convulsives, qui apparaissent toutes les cinq ou six minutes, deviennent plus rares, puis moins violentes ; la roideur diminue



Fig. 569. — Chien présentant les convulsions toniques de l'empoisonnement par l'oxygène.

dans les intervalles et finalement tout disparaît au bout de quelques minutes ou au plus de quelques heures.

« Dans les cas plus légers, au lieu d'attaques tellement violentes qu'on peut soulever l'*animal par une seule patte*, *roide comme un morceau de bois*, on observe des mouvements désordonnés, des convulsions locales. »

C'est là le tableau saisissant donné par le célèbre physiologiste d'un cas de moyenne intensité. Dans les cas très graves succédant au séjour dans un oxygène à très forte tension, les convulsions s'accentuent encore, la roideur est continuelle et l'animal ne tarde pas à succomber.

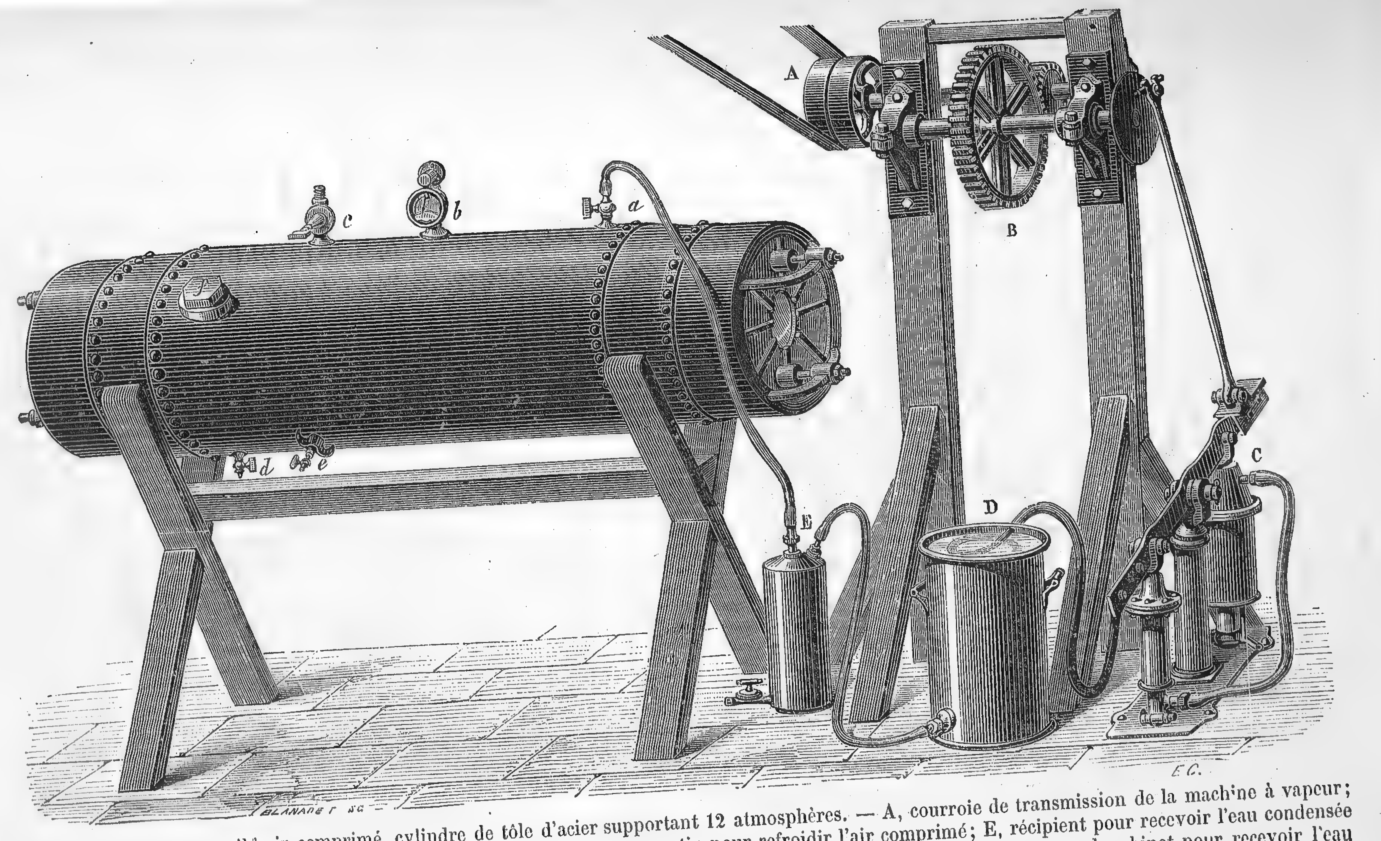


Fig. 570. — Grand appareil à air comprimé, cylindre de tôle d'acier supportant 12 atmosphères. — A, courroie de transmission de la machine à vapeur; B, système d'engrenages; C, pompe Denayrouse à compression; D, serpentin pour refroidir l'air comprimé; E, récipient pour recevoir l'eau condensée en D. — *a*, robinet par lequel arrive l'air comprimé; *b*, manomètre; *c*, gros robinet pour décompression brusque; *d*, robinet pour recevoir l'eau et l'urine contenues dans l'appareil; *f*, ouverture de fortes dimensions pour manipulations diverses.

Ces accidents sont calmés par les inhalations de chloroforme, mais ils reprennent dès que l'action de l'anesthésique a cessé. Comme pour les animaux déjà examinés, tout indique que l'oxygène localise son action toxique sur la moelle épinière. Ici encore, on note cet abaissement sensible de la température interne.

A la suite de la découverte de ces accidents si nouveaux et si frappants, il devenait très intéressant, pour pénétrer plus intimement dans la nature des phénomènes, de procéder à l'analyse des gaz du sang des animaux soumis à une forte pression.

Gaz du sang aux pressions supérieures à celles d'une atmosphère. — Dispositif des expériences. — On employait un cylindre en tôle d'acier (fig. 570) de $1^m,50$ de long et de 40 centimètres de diamètre à sa partie moyenne. Les deux extrémités du cylindre présentaient des orifices elliptiques qu'on pouvait fermer hermétiquement au moyen de plaques métalliques garnies d'écrous. Des hublots de verre enchâssés dans ces plaques permettaient de suivre les diverses modifications qui se produisaient chez l'animal enfermé dans le cylindre. Une pompe Denayrouse comprimait de l'air à l'intérieur du cylindre. Enfin l'appareil était muni de manomètres et de robinets qui permettaient de prélever des échantillons de l'air qu'il contenait.

Le dispositif suivant (fig. 571) permet de prendre dans l'artère la quantité de sang nécessaire aux analyses, sans interrompre la compression à laquelle l'animal est soumis.

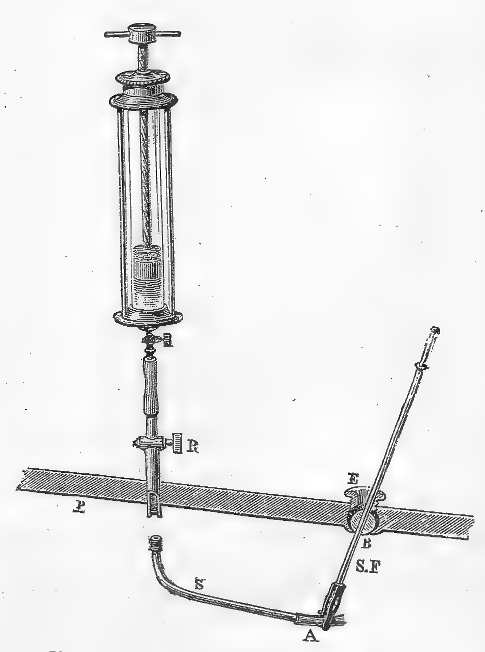


Fig. 571. — Extraction du sang d'un animal placé dans l'air comprimé.

Le chien attaché sur un cadre de forme appropriée au cylindre reçoit dans sa carotide une sonde métallique S. Quand l'animal est immobilisé, on fixe cette sonde à l'extrémité d'un tube qui traverse la paroi du cylindre et vient déboucher à l'extérieur où il est muni d'un robinet R. Une serre-fine SF peut glisser à frottement dans une balle de caoutchouc B qui ferme hermétiquement un large orifice pratiqué dans les parois du cylindre. Pendant qu'on comprime l'animal, la serre-fine empêche le sang de l'artère de pénétrer dans le tube S. Dès que la pression voulue est atteinte, on tire vers l'extérieur la serre-fine, le sang carotidien pénètre alors dans le tube S, et si on ouvre le robinet R, on le voit jaillir avec une force d'autant plus considérable que la pression à l'intérieur du cylindre est

plus forte. Il suffit donc d'adapter au robinet R une seringue à sang pour en recueillir la quantité nécessaire à l'analyse qu'on fait ensuite par la méthode habituelle à l'aide de la pompe à mercure.

Résultats. — a. *Oxygène.* — Il augmente d'une manière continue dans le sang à mesure que la pression croît, mais cette augmentation est peu considérable.

Voici un tableau obtenu en faisant les moyennes d'un grand nombre d'expériences et supposant que le sang artériel de tous les animaux contient une quantité invariable d'oxygène (20 centimètres cubes pour 100 de sang à 760).

Atmosphères.	Oxygène.
1	20
2	20,9
3	21,6
5	22,7
7	23,1
10	23,4

b. *Acide carbonique.* — La quantité d'acide carbonique contenu dans un volume de sang varie peu avec la pression ; mais, chose singulière, il y a plutôt tendance à la diminution quand la pression augmente ; il est difficile de comprendre la raison de cette diminution. P. Bert pense qu'elle tient à ce que l'animal soumis à une pression de plusieurs atmosphères voit ses oxydations diminuer.

c. *Azote.* — Il augmente, comme on devait s'y attendre, mais pas tout à fait aussi rapidement que le voudrait la loi de Dalton. Cependant, cette augmentation est assez sensible pour expliquer les accidents observés lors de la décompression brusque.

Atomsphères.	Azote.
1	2,2
2	3
3	3,9
5	6
7	7
10	9,4

Gaz du sang « in vitro ». — Il a paru intéressant à Paul Bert de comparer les résultats précédents à ceux qu'on obtiendrait en opérant sur le sang *in vitro*.

Il se servait dans ce but d'un appareil dont on trouvera la description dans son ouvrage (1). Le sang y était comprimé à une pression supérieure à celle qu'on voulait étudier ; on décomprimait à la pression voulue et on prélevait l'échantillon nécessaire à l'analyse qui se trouvait sûrement saturé d'oxygène à la pression voulue.

Résultats. — Pour les pressions supérieures à 1 atmosphère, la quantité d'oxygène du sang augmente avec la pression, et très sensiblement suivant la loi de Dalton.

Comparaison des analyses du sang soumis « in vivo » et « in vitro » à l'action de l'oxygène comprimé. — Lorsqu'on compare ces deux séries de

(1) P. Bert, *Pression barométrique*, p. 697.

résultats, on est frappé de ce fait que les chiffres obtenus avec le sang comprimé *in vitro* sont toujours sensiblement plus élevés que ceux fournis par le sang de l'animal soumis lui-même à la même pression. Cela tient à ce que le sang, à son passage dans le poumon, n'a pas le temps de se saturer, de fixer tout l'oxygène qu'il pourrait dissoudre ; de plus, aux fortes pressions, la respiration et la circulation sont ralenties, ce qui vient encore accentuer ce phénomène.

Explication de l'action toxique de l'oxygène sous forte tension. — Nous pouvons nous servir des résultats que nous ont donnés les analyses des gaz du sang pour comprendre d'une façon plus précise le mode d'action de l'oxygène dans les phénomènes convulsifs précédemment étudiés. P. Bert pensait, et les travaux récents, en particulier ceux de Hüfner, l'ont bien vérifié, que, à 38° et à la pression de 760 millimètres, l'hémoglobine était saturée d'oxygène, était tout entière transformée en oxyhémoglobine (1), était incapable de fixer une nouvelle quantité de gaz. Donc, tout le gaz qui est accumulé dans le sang par le fait de l'augmentation de pression ne l'est pas à l'état de combinaison, mais à l'état de dissolution, et c'est pour cela qu'il suit la loi de Dalton ; mais il n'est maintenu à cet état que grâce à la pression ; aussi possède-t-il une *tension* considérable.

Or, les éléments anatomiques, qui puisent dans les liquides qui les entourent leur oxygène au fur et à mesure de leurs besoins, trouvent d'ordinaire cet oxygène sous une tension bien plus faible ; ils sont adaptés à cette tension, et, si elle augmente par trop, leurs fonctions physiologiques sont profondément troublées ; loin d'être favorisées par cet oxygène sous trop forte tension, les oxydations qui, normalement, se passent à l'intérieur de la cellule, diminuent considérablement, ainsi que nous allons le voir ; secondairement, la température baisse.

Paul Bert avait du reste compris ce mécanisme de l'empoisonnement par l'oxygène. Ce qui constitue le danger, disait-il, ce n'est pas que dans le sang l'hémoglobine soit saturée et contienne une plus grande quantité d'oxygène, mais bien que tous les liquides de l'organisme en contact direct avec les cellules soient eux-mêmes saturés. Et ce qui prouve bien qu'il en est ainsi, c'est que les accidents ne se montrent que quelque temps après le début de la compression ; il faut donner aux liquides de l'organisme le temps de se saturer.

D'ailleurs, le sang soumis à l'action de l'oxygène comprimé ne révèle aucune altération au microscope ; injecté à un animal sain en grande quantité, il ne provoque aucun accident : ce sang ne paraît donc nullement altéré.

Diminution des oxydations sous l'influence de l'empoisonnement par l'oxygène. — Nous avons analysé les phénomènes extérieurs qui sont provoqués par l'oxygène sous forte tension ; nous avons examiné comment on pouvait comprendre l'influence de l'oxygène sur la vie des éléments anatomiques. Voyons maintenant quels sont les phénomènes chimiques qui apparaissent à l'intérieur de l'organisme pendant cette intoxication.

Nous avions déjà soupçonné la diminution des oxydations en voyant baisser

(1) Ceci n'est pas exact au point de vue théorique ; mais d'une façon pratique on peut concevoir que les choses se passent ainsi.

la température des animaux soumis à l'action de l'oxygène à haute tension. Des expériences plus précises ont montré à P. Bert que des animaux soumis à des pressions variant de 10 à 18 atmosphères présentent une diminution très notable dans la consommation d'oxygène et la production d'acide carbonique ; la diminution dans la consommation d'oxygène persiste même après la sortie de l'appareil.

Au moment où on retire l'animal de l'appareil, son sang est très riche en acide carbonique qui s'y est accumulé, puisque la respiration s'opérait dans un milieu confiné et riche en acide carbonique ; mais, au bout de peu de temps, cette quantité d'acide carbonique diminue et tombe même bien au-dessous de la moyenne ; c'est qu'en effet la respiration pulmonaire élimine rapidement l'acide carbonique accumulé dans le sang et qu'il ne s'en produit pas de nouveau, puisque les oxydations se sont considérablement ralenties.

La production de l'urée est aussi notablement diminuée chez les animaux soumis à 8 atmosphères de pression.

Sucre du sang. — Glycosurie. — Les accidents précédemment décrits s'accompagnent de glycosurie. Celle-ci serait due non à une hyperglycémie, mais à la diminution de la consommation du sucre par les éléments anatomiques.

P. Bert fait remarquer que la diminution dans la consommation des matières hydrocarbonées et sucrées s'accorde mal avec l'apparition des convulsions observées ; il suppose la formation, sous l'influence de l'oxygène comprimé, d'une substance toxique qui ne serait détruite ou éliminée que progressivement après la sortie de l'appareil, ce qui expliquerait la persistance des accidents après la cessation de l'action de l'oxygène sous forte tension.

Animaux aquatiques ou invertébrés. — Les insectes, les vers, les mollusques pulmonés souffrent du séjour dans l'air comprimé et suroxygéné. Les animaux deviennent immobiles, se fixent dans un coin de l'appareil et meurent sans avoir présenté aucun phénomène d'excitation.

Il en est de même des animaux aquatiques (petites anguilles de la montée, têtards de grenouilles). Ces derniers animaux présentent quelques secousses musculaires, mais rien qui rappelle les grandes convulsions du chien.

Action de l'oxygène sous tension sur les végétaux. — Les expériences de P. Bert lui ont montré, comme on devait s'y attendre, que les phénomènes de la vie des plantes étaient influencés dans le même sens que ceux des animaux.

La germination est ralentie d'une manière sensible dès qu'elle doit se faire sous la pression de 2 atmosphères dans l'air ordinaire.

A 5 atmosphères, le retard augmente.

Au-dessus de 7 atmosphères, les graines émettent quelques radicules, mais la germination ne s'effectue pas.

Vers 10 atmosphères, les graines sont tuées et ne germent plus, même quand elles sont ramenées à la pression normale.

Les plantes adultes souffrent elles-mêmes de leur séjour dans l'air comprimé. Les sensitives meurent en deux jours, déjà lorsque la pression atteint 6 atmosphères. Les végétaux paraissent donc encore plus sensibles que les animaux à l'augmentation de pression.

Action de l'oxygène sous tension sur les ferments figurés. — Les phénomènes de la putréfaction sont supprimés par l'air suffisamment comprimé. Les germes n'ont pu se développer dans ces conditions; ils ont été tués, car la putréfaction n'apparaît pas, même lorsqu'on vient à ramener la pression à la normale.

Les expériences de P. Bert ont été failes avec le muscle, le sang, les œufs, le lait, l'urine.

La levure de bière (*Saccharomyces cerevisiæ*), le *Mycoderma aceti*, le *Mycoderma vini* sont tués par l'oxygène sous forte tension.

Les moisissures sont aussi fâcheusement influencées par leur séjour dans l'air comprimé.

Ferments solubles. — Les diastases ne sont pas détruites, leur puissance d'action n'est pas amoindrie par le séjour dans un air comprimé qui tue les bactéries.

Elles peuvent agir sur les substances auxquelles elles sont adaptées, même pendant leur séjour dans l'air comprimé.

Diminution de la pression atmosphérique. — Elle se manifeste à l'homme dans deux circonstances : lorsqu'il gravit les montagnes, ou lorsqu'il s'élève en ballon dans les airs. Les symptômes éprouvés sont à peu près les mêmes dans les deux cas; nous allons d'abord les décrire en ayant surtout en vue les accidents du mal des montagnes qui a été mieux étudié et dans lequel les différentes phases de l'affection sont plus nettement séparées.

Symptômes du mal des montagnes. — D'une façon générale, le mal des montagnes rappelle beaucoup le mal de mer. Il débute par un malaise général, une angoisse, une fatigue de tout l'être; l'ascensionniste atteint n'a plus qu'un désir, s'arrêter, se reposer. Mais, comme il lui faut continuer son ascension, d'autres troubles ne tardent pas à apparaître: ce sont des nausées, des vomissements alimentaires, bilieux et même des hématémèses; ces accidents s'accompagnent souvent de coliques, de diarrhée. Les facultés cérébrales sont, elles aussi, atteintes; le malade se désintéresse de tout ce qui l'entoure, éprouve une paresse intellectuelle invincible. Du côté de l'appareil respiratoire, on observe une dyspnée souvent intense et fort pénible; elle cesse dès qu'on s'arrête, mais se manifeste de nouveau dès qu'on veut reprendre l'ascension. Les fonctions de l'appareil circulatoire sont également atteintes, le pouls diminue d'ampleur, mais, par contre, augmente de fréquence dans des proportions souvent considérables.

Les hémorragies pulmonaires, nasales, rénales, signalées par certains auteurs, sont très rares.

Étiologie. — A quelle hauteur apparaît le mal des montagnes? Les ascensionnistes l'éprouvent à une hauteur beaucoup plus faible que les aéronautes.

Ainsi, ces derniers ne commencent à souffrir de la diminution de pression atmosphérique qu'au voisinage de 7000 mètres, tandis que les premiers éprouvent déjà les symptômes du mal des montagnes vers 3000 mètres. Rien d'ailleurs ne varie plus que cette hauteur. Chose singulière et difficilement explicable, le mal des montagnes semble ne pas se manifester à la même altitude dans les différentes chaînes de montagnes; ainsi, tandis qu'il apparaît

dans les Alpes vers une hauteur de 3000 mètres, il faut monter beaucoup plus haut pour l'éprouver dans les Andes, le Caucase, l'Himalaya. Il semble même que certains endroits soient favorables à l'éclosion du mal des montagnes; le Couloir du mont Blanc est célèbre sous ce rapport; c'est même ce fait qui avait donné créance à l'opinion erronée d'après laquelle le mal des montagnes serait dû au dégagement de gaz méphitiques. En règle générale, cette indisposition se manifeste au voisinage de la limite des neiges éternelles.

Il existe aussi de grandes variations individuelles. Certains individus paraissent prédisposés à ce malaise, d'autres n'en souffrent presque jamais.

L'accoutumance a une grande importance; il est certain que les montagnards, les guides de profession sont très rarement atteints du mal des montagnes; il semble qu'il y ait là une adaptation au milieu, qui existe parfaitement en réalité ; nous en verrons bientôt le mécanisme.

La fatigue est une cause adjuvante importante du mal des montagnes; l'épuisement nerveux également; enfin, le froid paraît agir dans le même sens, ce qui explique la fréquence de l'apparition des accidents au voisinage de la limite des neiges; ce fait expliquerait également pourquoi le mal des montagnes apparaît à 3000 mètres dans les Alpes et seulement à 4000 ou 5000 mètres dans les Andes et l'Himalaya, montagnes sur lesquelles la limite des neiges éternelles est fort élevée.

Pathogénie du mal des montagnes. — Nulle affection n'a donné lieu à plus de théories; beaucoup d'entre elles ne méritent pas qu'on s'y arrête.

Théories simplistes. — Les habitants des pays montagneux, ignorant les lois les plus élémentaires de la physique et de la chimie, ne pouvaient soupçonner la véritable cause des malaises qu'ils éprouvaient; ils les rapportèrent au dégagement de gaz toxiques, à la présence de plantes et de minéraux vénéneux, toutes causes qui ne peuvent pas être invoquées, puisqu'elles existent parfois dans les pays de plaine et qu'elles ne donnent lieu à aucun accident comparable à ceux qui nous occupent.

Théories physiques. — La théorie électrique aurait voulu que l'électricité s'accumulât sur les montagnes à cause de leur forme conique et que cette électricité fût la cause du mal des montagnes. Passons.

Certains physiciens, trompés par des analyses inexactes, avaient cru que le mal des montagnes était dû à la diminution dans la proportion d'oxygène de l'air des montagnes. Des analyses répétées ont montré que l'air des plus hauts sommets avait exactement la même composition centésimale que l'air des plaines; les hypothèses de Humboldt et Boussingault ne sont donc plus soutenables.

La fatigue ne peut à elle seule produire les accidents en question, car elle devrait avoir les mêmes effets en plaine.

Lortet et Dufour croient observer que la température des alpinistes baisse pendant l'ascension; ils attribuent ce fait à une excessive transformation de la chaleur en mouvement d'où résulteraient les accidents du mal des montagnes. Il y a dans cette opinion une erreur de doctrine manifeste, puisque, en aucun cas, dans le corps des animaux, la chaleur ne peut se transformer en mouvement, mais qu'elle est un excretum qui fait forcément retour au

monde extérieur. Et d'ailleurs l'observation dont ces auteurs sont partis était inexacte, la température des ascensionnistes, comme de tous ceux qui se livrent à un travail pénible, monte un peu au lieu de baisser.

Théories mécaniques. — La théorie qui veut voir la cause des accidents dans les effets mécaniques de la diminution de pression ne nous arrêtera pas; nous avons pris la peine de réfuter, au commencement de ce travail, cette théorie erronée qui procède d'une ignorance complète des lois élémentaires de la physique.

Robert Boyle, Borelli, Rostan, Guilbert et Gavarret ont admis que, sous l'influence de la diminution de pression, les gaz du sang se dégageaient, devenaient libres et produisaient des embolies gazeuses d'où résulteraient tous les accidents observés. Il y aurait là un phénomène analogue, à l'intensité près, à celui que nous avons vu se produire chez les animaux qui passent brusquement d'une pression de 6 ou 8 atmosphères à la pression normale.

Mais les accidents du mal des montagnes ne ressemblent en aucune façon à ceux qui sont déterminés par la décompression brusque, et d'ailleurs ce mécanisme ne peut être sérieusement invoqué. L'expérience prouve, en effet, qu'un animal amené, même assez rapidement, à une pression voisine de celle qui existe à 4000 mètres d'altitude et plus, ne présente dans son sang aucune bulle gazeuse.

A fortiori, en est-il ainsi chez les animaux qui subissent une décompression très progressive qui permet aux gaz qui sont en excès de s'échapper au niveau du poumon.

La dilatation des gaz du tube digestif et la pression qu'ils exerceraient sur les organes abdominaux seraient pour certains auteurs la cause des accidents observés chez les ascensionnistes; mais il est inadmissible, comme nous l'avons déjà fait remarquer dans une autre partie de ce travail, que des gaz contenus dans le tube digestif, qui est à ses deux extrémités en communication avec l'atmosphère, puissent exercer une semblable pression.

Enfin, on a cru que, la pression de l'air diminuant, le poumon se recroquevillait vers son pédicule; mais il faudrait, pour que ce phénomène se produisît, que l'élasticité propre du poumon arrivât à vaincre la pression atmosphérique. Or, cette élasticité propre ne fait équilibre qu'à 6 millimètres de mercure. Cette théorie, comme toutes celles que nous avons passées en revue, n'a donc aucune valeur et doit être abandonnée.

Théories chimiques. — Suivant M. Gavarret, le mal des montagnes serait dû à l'accumulation dans le sang de l'acide carbonique produit en excès par le travail de l'ascension.

Mais, 1° les accidents qui nous occupent n'ont aucun point commun avec les troubles que présente un animal respirant dans une atmosphère enrichie en acide carbonique; 2° on ne comprendrait pas comment ce gaz peut s'accumuler dans le sang, étant donnée la facilité avec laquelle il s'élimine par le poumon; 3° les aéronautes sont pris parfois d'accidents graves, et ils ne fournissent cependant aucun travail musculaire producteur d'acide carbonique; 4° enfin, les mêmes accidents n'apparaissent jamais en plaine, même chez ceux qui se livrent au travail le plus violent.

M. Mosso, le physiologiste bien connu de Turin, a récemment défendu une théorie dont nous allons parler maintenant et qui est la contre-partie de celle de Gavarret. C'est la théorie de l'acapnie (1).

Dans une première publication (2), Mosso émet l'opinion que le mal des montagnes est dû uniquement à la diminution de l'acide carbonique du sang qui s'éliminerait par le poumon à la faveur de la diminution de pression. Empiétant sur la suite, nous pouvons dire que le mal des montagnes est dû en grande partie à la diminution d'oxygène du sang; pour Mosso : « Ce n'est pas l'oxygène qui manque, c'est l'acide carbonique qui ne reste plus dissous en quantité suffisante dans le sang artériel. Les centres de la respiration, des mouvements du cœur, des vaisseaux sentent ce défaut, et leurs fonctions changent. » Dans un second travail (3), plus étendu que le premier, Mosso, faisant des concessions à la théorie classique, admet que le mal des montagnes n'est pas dû uniquement à la diminution d'oxygène, mais aussi à la diminution d'acide carbonique. Les arguments du physiologiste de Turin sont tirés de l'observation et de l'expérience. Comme fait d'observation, Mosso cite le suivant : « Le mal des montagnes est plus grave la nuit et pendant le repos, alors que précisément la consommation de l'oxygène est moindre; mais alors aussi, la production de l'acide carbonique est également moindre. » Nous révoquons en doute cette opinion contraire à celle des ascensionnistes qui s'accordent tous, comme nous l'avons dit déjà, à considérer que le mal des montagnes s'accentue par l'exercice pour disparaître lors du repos.

Mosso étudie sur lui-même et sur son garçon de laboratoire les effets de la diminution de pression en s'enfermant dans une cloche où une pompe fait un vide progressif. Le patient se laisse décomprimer jusqu'au moment où, menacé d'une syncope, il respire de l'oxygène contenu dans un sac placé près de lui. (Et, remarquons-le, c'est l'aveu que cet oxygène est bien utile pour écarter les accidents menaçants.) On a eu soin d'ailleurs de prélever un échantillon de l'air de la cloche avant d'ouvrir le gazomètre à oxygène.

On recommence alors à faire le vide dans la cloche et on prélève un nouvel échantillon de l'air de cette cloche au moment où le patient se sent menacé d'une nouvelle syncope.

Le résultat des analyses des échantillons prélevés est le suivant :

1re prise de gaz........	Pression	336 millimètres.	
	Oxygène.	En volume à 0° et à 760.	19,9 p. 100.
		En poids à 336 millim.	10 —
	Ac. carbonique.	0,9 p. 100.	
2e prise de gaz........	Pression.......	246 millimètres.	
	Oxygène.	En volume à 0° et à 760.	17 p. 100.
		En poids à 336 millim.	6 —
	Ac. carbonique.	2,2 p. 100.	

Ainsi, dans le second cas, le mal des montagnes ne s'est manifesté que

(1) De ἄκαπνος, sans fumée.
(2) *Comptes rendus de la Soc. de biol.*, 1897, p. 223.
(3) Mosso, L'académie et le mal des montagnes (*Rev. gén. des sciences*, 15 mars 1899, p. 178).

pour une dépression plus accentuée (246 millimètres au lieu de 336 millimètres), bien que le gaz respiré à ce moment fût moins riche en oxygène que celui de la première expérience. Mosso attribue ce résultat à la proportion plus grande d'acide carbonique dans le second cas. Ce n'est cependant pas la seule interprétation du phénomène qui se présente à l'esprit, et il est très probable que les choses se seraient passées de la même façon si la proportion de CO^2 n'avait pas varié dans l'air de la cloche. Un ascensionniste pris par le mal des montagnes et qui se repose quelques instants peut ensuite repartir et continuer quelque temps son ascension; la proportion d'acide carbonique est cependant restée la même dans l'air qu'il respire.

Enfin, le fait suivant n'est pas en faveur non plus de la théorie de Mosso. On peut, comme l'ont fait Héring et A. Ewald (1), faire perdre au sang d'un animal environ la moitié de l'acide carbonique qu'il contient en activant sa ventilation pulmonaire au moyen d'un appareil à respiration artificielle; on peut sur soi-même faire la même opération en faisant intervenir la volonté; on voit dans ce cas survenir l'*apnée*: c'est un fait bien connu des physiologistes, mais jamais on n'observe les symptômes du mal des montagnes.

Nous ne pensons donc pas que la théorie de l'*acapnie* puisse expliquer les accidents observés chez les ascensionnistes ou les aéronautes.

Mais déjà, en discutant les résultats de Mosso, nous avons laissé entrevoir la vraie cause du mal des montagnes. On peut en effet remarquer, avec de Saussure, que si la composition centésimale de l'air des altitudes est la même que celle de l'air de la plaine, c'est-à-dire que si les proportions d'oxygène, d'azote et d'acide carbonique contenus dans un volume donné ne varient pas, il n'en est pas de même de la quantité absolue de chacun de ces gaz; ainsi, il est bien évident qu'à une demi-atmosphère de pression, le poids d'oxygène contenu dans un litre d'air sera moitié de ce qu'il est à 760 millimètres.

De Saussure, Martins, Jourdanet ont eu tous trois l'intuition que là était le nœud de la question; ils ont pressenti le retentissement que cette diminution dans la quantité absolue d'oxygène, c'est-à-dire dans sa tension partielle, allait avoir sur la teneur du sang en oxygène; mais il fallait des expériences pour confirmer ces vues: ce fut P. Bert qui les fit. Les résultats du célèbre physiologiste reçurent encore une interprétation plus claire après qu'eurent paru les travaux de Hüfner sur la dissociation de l'oxyhémoglobine et ceux des auteurs qui se sont occupés de tonométrie, Pflüger et ses élèves, Chr. Bohr et Léon Frédéricq. Ce sont ces divers travaux que nous allons maintenant exposer.

Gaz du sang d'un animal placé dans une atmosphère raréfiée. — On sait que l'oxygène existe dans le sang sous deux états: 1° dissous; il obéit alors à la loi de Dalton-Henry; 2° faiblement combiné à l'hémoglobine sous forme d'oxyhémoglobine. Cette combinaison de l'oxygène avec l'hémoglobine est facilement dissociable. Cette dissociation est sous la dépendance de trois facteurs; la pression, la température, la proportion d'hémoglobine contenue dans le sang. On sait que les deux derniers facteurs, température

(1) Zür Kenntniss der Apnoë (*Pflüger's Archiv*, vol. III, p. 575, 1873), cité par Mosso.

et proportion d'hémoglobine, restant constants, la tension de dissociation augmente lorsque la pression diminue, c'est-à-dire que dans ces conditions on voit la quantité d'hémoglobine du sang augmenter, la quantité d'oxyhémoglobine diminuer, que, par conséquent, on constate que le sang contient moins d'oxygène dans un volume donné.

Ces résultats généraux et élémentaires étant rappelés, voyons comment on a pu les obtenir en opérant sur le sang *in vivo* et *in vitro*.

Il ne fallait pas songer, pour faire ces expériences, à se transporter avec un animal sur une montagne : l'analyse des gaz du sang est une opération délicate qui ne peut être menée à bien que dans un laboratoire. Il fallait donc de toute nécessité faire construire un matériel spécial d'expériences. P. Bert put le faire installer au laboratoire de la Sorbonne grâce, à la munificence de Jourdanet.

L'appareil complet se compose de deux grandes cloches métalliques A A'. Elles communiquent entre elles par un large tuyau muni d'un robinet. Une

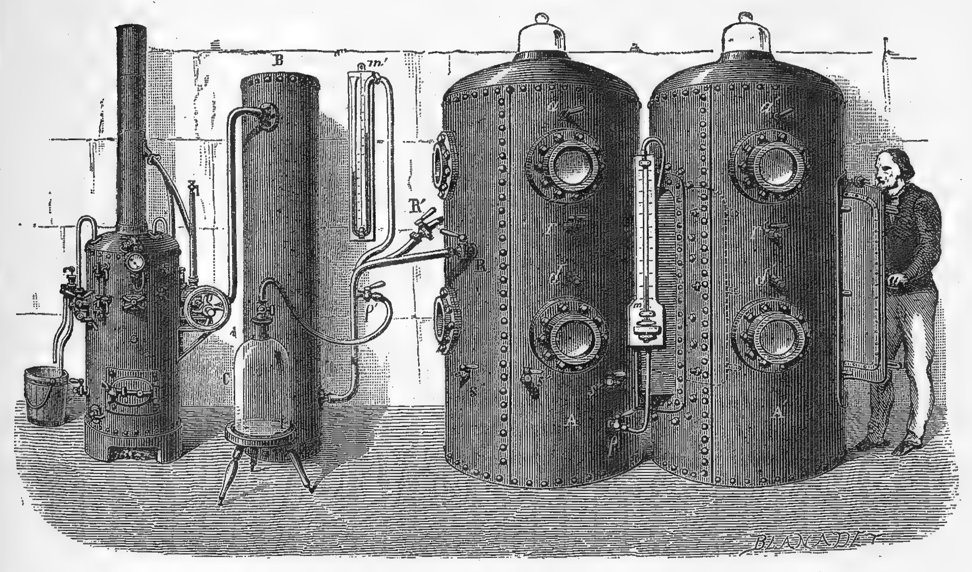


Fig. 572. — Appareil pour l'étude expérimentale du mal de montagne.

des cloches (A') présente une ouverture qui peut être fermée hermétiquement par une porte garnie de coussins de caoutchouc, Des hublots de verre permettent de voir ce qui se passe à l'intérieur de ces chambres métalliques. Elles sont en rapport avec une pompe qui permet d'y faire un vide graduel. Enfin les cloches peuvent être mises en communication avec un grand cylindre métallique B dans lequel on a fait le vide au préalable ; il est possible par ce moyen d'obtenir une chute brusque de pression dans les cloches.

Le chien soumis à l'expérience est attaché sur une gouttière et introduit dans une des cloches ; une canule est introduite dans sa carotide. Il est

nécessaire de prélever du sang à l'animal pendant qu'il est placé dans l'air raréfié; on y parvient par un artifice analogue à celui qui a déjà été décrit à propos de l'analyse du sang d'un animal soumis à l'action de l'air comprimé. La carotide A est mise en communication avec un tube *a* fermé par un robinet *r* et raccordé avec une seringue à sang *s*. Une serre-fine S comprime l'artère et empêche le sang de pénétrer dans le tube *a*. Serre-fine et tube traversent la paroi de la cloche P à travers des bouchons de caoutchouc qui empêchent toute communication avec l'intérieur. Au moment où on veut faire une prise de sang, on ouvre le robinet *r*, on tire la tige intérieure de la serre-fine, le sang pénètre dans la seringue à mesure qu'on soulève le piston. On procède alors à l'analyse des gaz de ce sang avec la pompe à mercure par la méthode ordinaire.

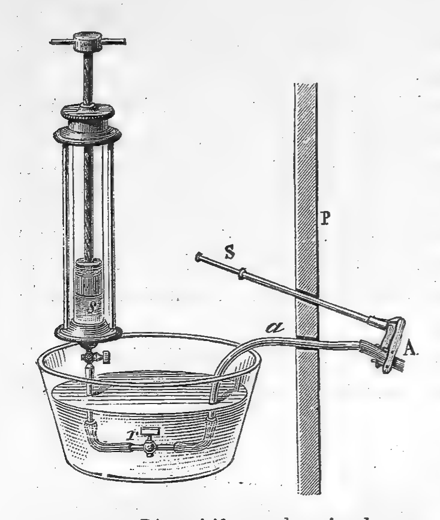


Fig. 573. — Dispositif pour la prise du sang sous dépression.

Résultats. — On trouvera dans le livre de P. Bert sur la *Pression barométrique* (page 643) un tableau renfermant les résultats d'un nombre considérable d'expériences. Nous allons donner ici le résultat d'une expérience idéale qui n'est autre chose que la moyenne de plusieurs des expériences de P. Bert.

PRESSION	GAZ CONTENUS DANS 100 c. c. de sang. O	CO^2	O disparu en volume.	CO^2 disparu en volume.
	c.c.	c.c.		
760 millimètres	19,7	34,8	»	»
590 — (2000^m)	16,9	33,2	2,8	1,6
450 millimètres	15,6	30,2	4,1	4,6
340 —	10,8	29,3	8,9	5,5
250 —	10,1	23,2	9,6	11,5
170 —	7,3	12,4	12,4	22,4

La lecture du tableau qui résume cette expérience nous montre donc qu'à mesure que la pression décroît, les quantités d'oxygène et d'acide carbonique contenus dans un volume déterminé de sang diminuent aussi.

Le graphique suivant rendra ce résultat encore plus saisissant. Sur la ligne des X sont portées les pressions; sur la ligne des Y les quantités d'oxygène et d'acide carbonique contenus dans 100 centimètres cubes de sang.

Ainsi les expériences de P. Bert ont rendu certain le fait soupçonné par Jourdanet; il n'est pas douteux qu'à mesure qu'un animal s'élève dans les

airs ou sur les flancs d'une montagne, les gaz de son sang et en particulier l'oxygène aillent constamment en diminuant.

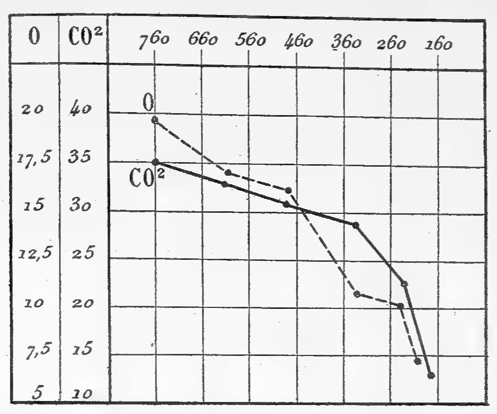


Fig. 574. — Graphique représentant les quantités de O et de CO^2 contenues dans le sang en fonction de la pression.

Absorption de l'oxygène par le sang « in vitro » aux différentes pressions. — Expériences de P. Bert. — Il était intéressant de voir si le sang *in vitro* se comporte comme dans les vaisseaux d'un animal lorsque la pression de l'air avec lequel il est en contact varie dans les mêmes limites que précédemment. P. Bert se servit dans ce but du flacon figure 575. On voit qu'il est fermé par un bouchon de caoutchouc à trois trous traversé par un thermomètre et par deux tubes dont l'un arrive jusqu'au fond du vase et est

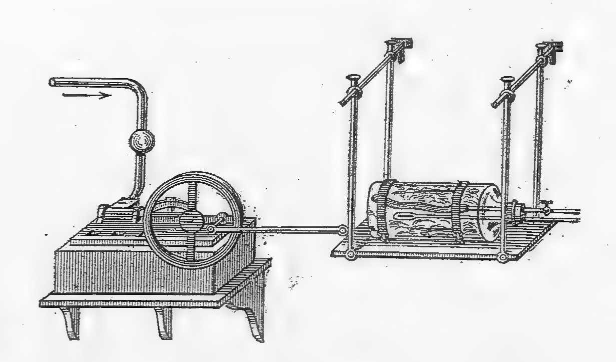


Fig. 575. — Appareil pour étudier la dissolution de l'oxygène dans le sang *in vitro*.

Fig. 576. — Appareil pour l'agitation du sang à diverses pressions.

continué à l'extérieur par un tube de caoutchouc muni d'un robinet R.

L'autre tube traverse seulement le bouchon et s'arrête à la partie supérieure du flacon ; il est fermé par le robinet R′ et se prolonge par un tube coudé raccordé à un tube vertical *b* qui plonge dans une cuvette remplie de mer-

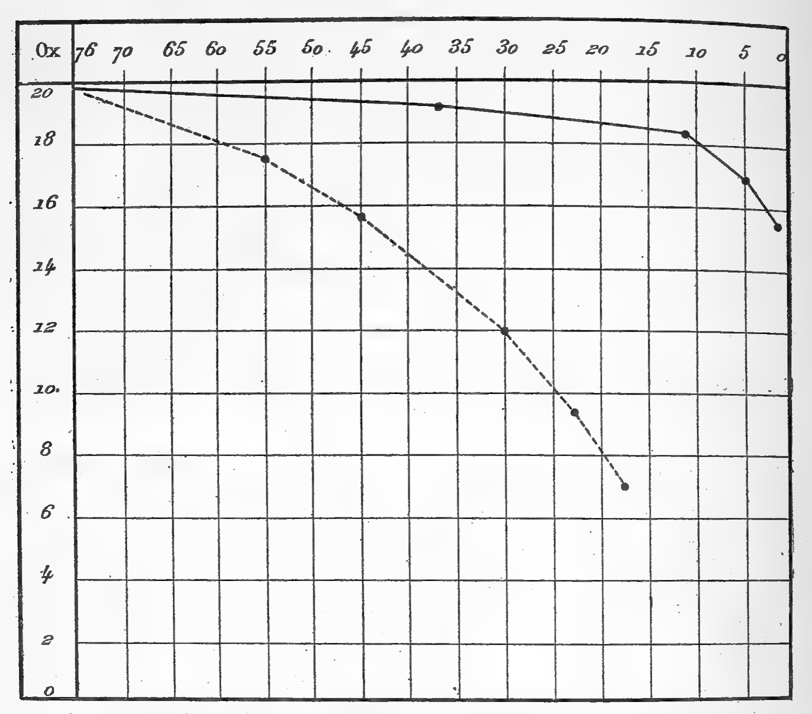


Fig. 577. — Graphique montrant comparativement l'absorption de l'oxygène par le sang (*in vitro*, ligne supérieure ; circulant, ligne inférieure), à diverses pressions. La température est dans le premier cas à 15 degrés.

cure. Ce tube *b* constituera un manomètre qui, à chaque instant, donnera la pression à l'intérieur du flacon. Pour faire une expérience, on verse dans le flacon une certaine quantité de sang défibriné. Au moyen d'une machine pneumatique qu'on met en communication avec la branche *a*, on raréfie l'air du flacon jusqu'à ce qu'on ait atteint la pression voulue. A ce moment, on ferme le robinet R′ et, après avoir détaché les tubes *a* et *b*, on porte le flacon sur la balancelle représentée figure 576 ; l'agitation que le petit moteur à eau communique à la balancelle brasse le sang avec le gaz que contient le flacon. Remettant alors le flacon dans une situation verticale et adaptant une seringue au tube de caoutchouc du robinet R qu'on ouvre, on aspire avec la seringue une quantité déterminée de sang dans laquelle on dose l'oxygène.

Lorsque l'agitation du sang a eu lieu à la température ordinaire (15° environ), les quantités d'oxygène fixées par le sang ne correspondent pas du tout à celles qu'on a trouvées en puisant directement le sang à l'animal : elles sont beaucoup plus considérables, comme le montre le graphique de la figure 577.

Au contraire, lorsque le flacon est maintenu pendant l'agitation à la température de 38°, les quantités d'oxygène fixées par le sang aux différentes pressions se rapprochent beaucoup plus des résultats obtenus avec le sang pris à l'animal vivant. C'est ce qu'on voit nettement sur la figure 578.

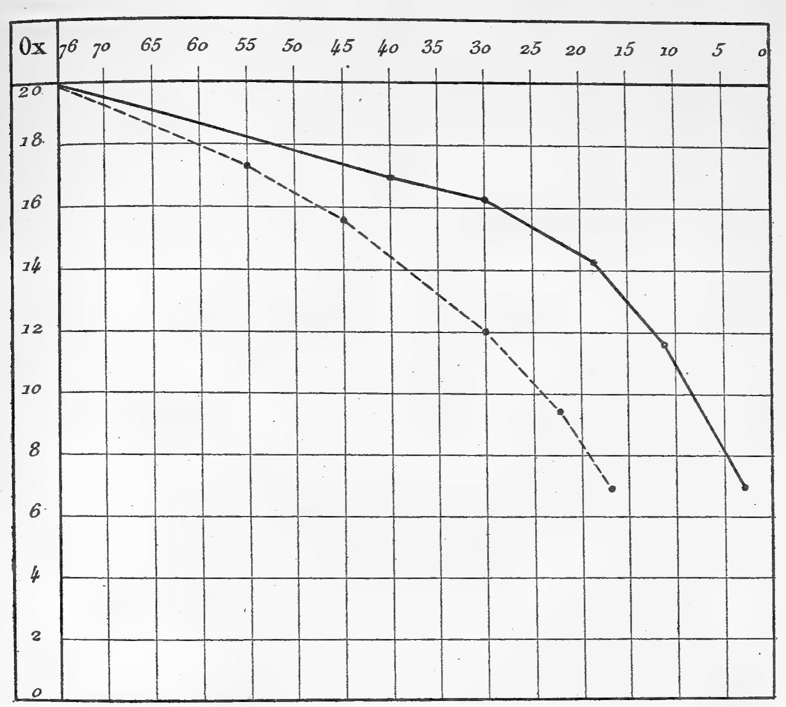


Fig. 578. — Graphique montrant l'absorption de l'oxygène par le sang (*in vitro*, ligne supérieure; circulant, ligne inferieure). Dans les deux cas, la température est à 38 degrés.

Comment expliquer cette importance de la température dans le phénomène qui nous occupe? il nous faut pour cela dire un mot de la dissociation de l'oxyhémoglobine.

Travaux de Hüfner, Ch. Bohr, etc. — Comme nous l'avons déjà rappelé, l'oxygène existe dans le sang sous deux formes : une très faible quantité est simplement dissoute dans le plasma, elle suit la loi de Dalton; la majeure partie, au contraire, est combinée au pigment qui imprègne le globule rouge, l'hémoglobine. Cette oxyhémoglobine résultant de l'union de l'oxygène avec l'hémoglobine est un composé facilement dissociable en ses deux éléments constituants.

Une étude très soignée de ce phénomène a été faite par plusieurs auteurs parmi lesquels nous citerons surtout Hüfner (1) et Ch. Bohr (2). Ces physiologistes opéraient avec des solutions titrées d'hémoglobine pure dans l'eau

(1) *Zeitschr. für physiol. Chem.*, t. VI, p. 94, 1881 ; t. XII, p. 567, 1888, et t. XIII, p. 285, 1889.
(2) *Bull. de l'Acad. roy. danoise*, 9 mai 1890.

distillée. Ils ont vu que la tension de dissociation était régie par trois facteurs : la pression de l'oxygène, la température et le titre en hémoglobine de la solution. En particulier, en ce qui concerne la température, ils ont vu qu'à mesure qu'elle s'élevait, la tension de dissociation croissait aussi; ce qui revient à dire que, à mesure que la température croît, les autres conditions restant invariables, une même solution d'hémoglobine absorbe de moins en moins d'oxygène; ainsi se trouve expliquée la différence observée entre les analyses d'oxygène du sang agité à 15° et à 37°.

Disons d'ailleurs qu'en ce qui concerne la pression, les auteurs précédents, opérant avec des solutions d'hémoglobine dans l'eau distillée, ont vu comme P. Bert, opérant avec le sang défibriné, que la tension de dissociation de l'oxyhémoglobine augmentait lorsque la pression de l'oxygène diminuait. Les chiffres trouvés par Hüfner et P. Bert sont d'ailleurs remarquablement concordants.

Mais si l'accord est satisfaisant entre les résultats obtenus avec les solutions titrées d'hémoglobine et le sang défibriné, il est beaucoup moins acceptable en ce qui concerne le sang défibriné comparé au sang de l'animal vivant. On voit en effet dans ce cas (fig. 578) que le sang de l'animal vivant contient, à une même température et à une même pression, sensiblement moins d'oxygène que le sang agité *in vitro*. Ce résultat voudrait-il signifier que la tension de dissociation de l'oxyhémoglobine n'est pas la même *in vitro* et dans les vaisseaux de l'animal? Nullement, mais il nous faut tenir compte de plusieurs facteurs qui avaient été laissés dans l'ombre et que Hüfner (1) a eu le mérite de mettre en évidence.

D'abord, dans le poumon, le sang n'entre pas en rapport avec de l'air pur, mais bien avec l'air alvéolaire, dans lequel la tension de l'oxygène est toujours sensiblement inférieure à celle de l'oxygène de l'air dans lequel est plongé l'animal. Mais le calcul montre que cette raison ne suffirait pas encore à expliquer les différences observées; aussi, comme le fait remarquer Hüfner (2), il faut faire intervenir un nouveau facteur : le temps. Il est évident, en effet, que la quantité d'oxygène absorbée par un poids déterminé d'hémoglobine est proportionnelle à la différence de tension entre l'oxygène de l'air alvéolaire et l'oxygène du sang veineux. Or la tension de l'oxygène alvéolaire dans le phénomène qui nous occupe a considérablement diminué; il en résulte qu'en un temps donné il pénètre beaucoup moins d'oxygène dans le sang. Chaque globule, pour prendre dans le poumon la quantité d'oxygène à laquelle il a droit, devrait rester bien plus longtemps au voisinage de l'air alvéolaire; mais il ne le peut pas et s'en va avec une provision incomplète d'oxygène. Ainsi s'explique ce fait que le sang contient une quantité d'oxygène inférieure à la quantité théorique, et nous comprenons à quelle raison est due la divergence des deux courbes de la figure.

Vérification expérimentale de l'influence de l'anoxyhémie sur le mal des montagnes. — L'étude chimique du sang que nous venons d'exposer

(1) *Dv Bois-Reymond's Archiv für Physiol.*, 1890, p. 20. — Voy. aussi à ce sujet LAMBLING, *Le sang et la respiration* (*Encyclopédie chimique*, p. 362).
(2) *Du Bois-Reymond's Archiv für Physiol.*, 1890, p. 20.

nous a montré que, pour une diminution de pression suffisante, le sang d'un animal placé dans une atmosphère raréfiée s'appauvrit en oxygène. Il semble donc logique de voir dans cette diminution de la teneur en oxygène, la véritable cause du mal des montagnes ; mais il en fallait donner une preuve formelle; c'est encore P. Bert qui l'a fait au moyen de l'ingénieuse expérience qui suit.

Elle est fondée sur cette remarque que si le mal des montagnes est dû à l'anoxyhémie, ce n'est pas la pression de l'air total qui importe, mais seulement la *tension partielle* de l'*oxygène* du mélange.

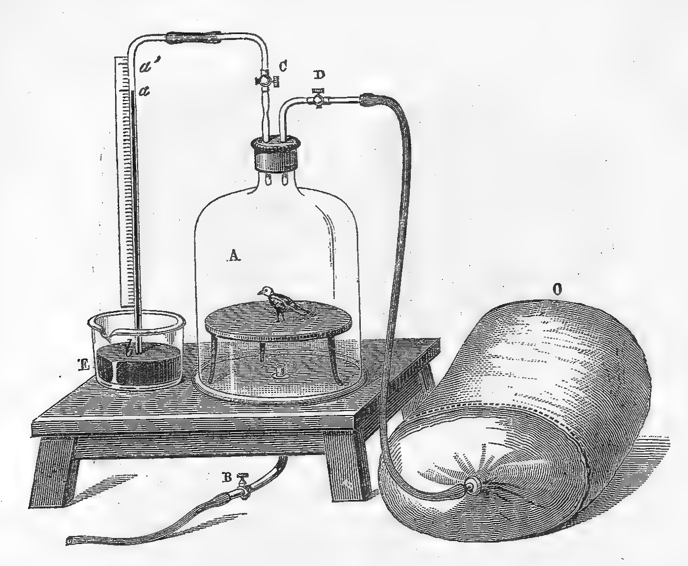


Fig. 579. — Dispositif de P. Bert, destiné à démontrer que les accidents anoxyhémiques ne dépendent que de la tension partielle de l'oxygène dans l'air inspiré.

Plaçons donc un oiseau sous la cloche de la machine pneumatique et faisons le vide jusqu'à ce qu'il présente les symptômes du mal des montagnes ; à ce moment, notons la pression p de l'air contenu dans la cloche (elle est donnée par le manomètre a).

Ouvrons alors le robinet D, qui permettra l'arrivée dans la cloche A d'une partie de l'oxygène contenu dans le sac O ; nous verrons l'oiseau se rétablir très rapidement, première preuve du rôle de l'oxygène dans ces accidents. Ayant fermé le robinet D, recommençons à faire le vide ; nous constaterons qu'au moment où l'oiseau présente les premiers symptômes du mal des montagnes la pression p' dans la cloche est très inférieure à p ; ainsi, dans cette atmosphère enrichie en oxygène, il a fallu pousser le vide beaucoup plus loin que dans l'air ordinaire pour obtenir les mêmes effets.

Si, au lieu d'oxygène, on laisse rentrer de l'azote sous la cloche de la machine, les accidents présentés par les animaux ne sont en aucune façon améliorés.

La preuve est donc formelle, le mal des montagnes est produit par l'anoxyhémie.

Paul Bert a voulu répéter sur lui-même l'expérience précédente. Il le fit au moyen des cloches déjà décrites (fig. 580). Il s'y plaça et disposa à côté de lui un sac de caoutchouc rempli d'oxygène. On fit un vide progressif au moyen de la pompe aspirante. P. Bert ressentit les premiers symptômes du mal des montagnes lorsque la pression se fut abaissée à 41 centimètres (hauteur du mont Blanc). Quelques inhalations d'oxygène, et les éblouissements qu'il éprouvait disparurent aussitôt. La raréfaction de l'air continuant à s'opérer par le

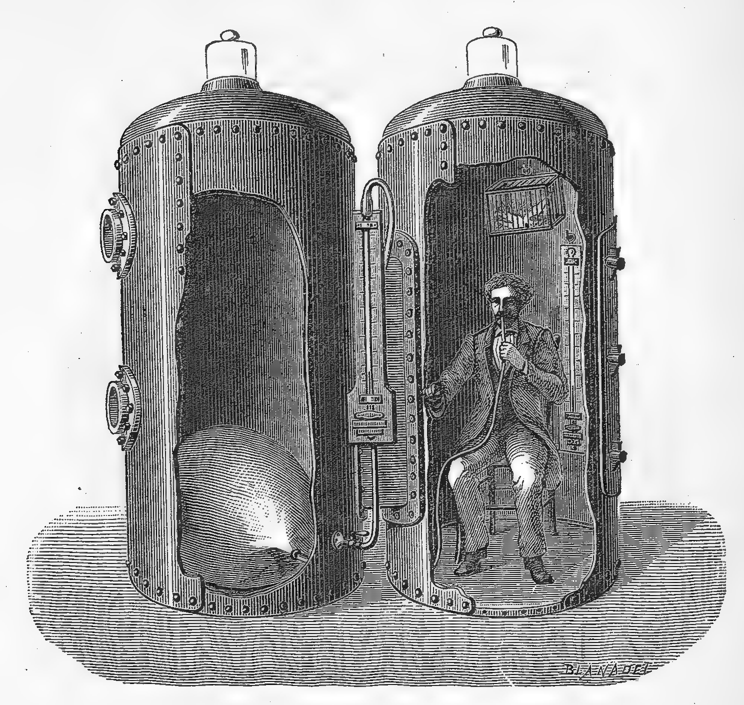


Fig. 580. — Paul Bert répète sur lui-même son expérience sur l'anoxyhémie.

jeu des pompes, la pression tomba à 24 centimètres (hauteur du mont Everest). On peut encore diminuer la pression, à condition de tenir à la main le tube amenant l'oxygène du ballon et d'en respirer à la première menace de syncope ; c'est ainsi que Mosso a pu se soumettre dans une cloche à vide à une pression de 192 millimètres (ce qui correspond à une altitude de 11 650 mètres).

Le physiologiste italien fait remarquer qu'il est l'homme qui jusqu'à présent est monté le plus haut dans l'atmosphère.

Paul Bert répéta sur Crocé-Spinelli et Sivel cette expérience capitale. Quelques semaines plus tard, ces deux aéronautes périssaient dans l'ascension du *Zénith*, probablement au moment où ils n'étaient plus soumis qu'à une pression de 262 millimètres, correspondant à une hauteur de 8 600 mètres

environ ; ils avaient été pris d'une syncope si brusque qu'ils n'avaient pu utiliser l'oxygène dont ils s'étaient munis.

Mécanisme intime des accidents observés dans le mal des montagnes. — Les expériences précédentes ont établi de la façon la plus claire que le mal des montagnes était dû à la diminution de la teneur en oxygène du sang. Mais il nous faut pénétrer maintenant d'une façon plus intime ces phénomènes et nous efforcer de comprendre comment la diminution de charge du globule rouge en oxygène peut retentir sur l'intensité des échanges des éléments anatomiques qui l'entourent.

Toutes les manifestations extérieures de la vie chez les êtres vivants correspondent à une production de force vive qui résulte de la transformation de l'énergie chimique ou potentielle des aliments en énergie actuelle.

L'oxydation est le mode général de transformation, d'utilisation de cette énergie chimique potentielle. Nous n'avons pas ici à faire connaître les agents qui sont, dans l'organisme, les promoteurs de ces oxydations, mais seulement à nous rendre compte comment l'oxygène du sang arrive au contact des éléments anatomiques à l'intérieur desquels s'opèrent les combustions.

Si on met une quantité indéfinie de sang à une température déterminée, 38° par exemple, en contact avec un espace très petit où existe un vide absolu, on constatera que de l'oxygène se dégage dans l'espace vide et acquiert une certaine tension. Or on a construit des instruments qui permettent de connaître la tension de l'oxygène du sang artériel : ce sont les tonomètres. Pflüger et ses élèves, Wolfberg, Strassburg, Nussbaum, ont fait des déterminations de ce genre.

Les résultats qui paraissent se rapprocher le plus de la vérité sont ceux qui ont été obtenus par Léon Frédéricq (1). Son tonomètre, très simple, se composait d'un simple tube rétréci à ses deux extrémités et entouré d'un manchon de verre contenant de l'eau à 38 degrés.

Le sang d'un animal (rendu incoagulabie par une injection de peptone) entrait par l'extrémité supérieure du tube qu'on mettait en communication avec une artère ; il ruisselait sur les parois et retournait par l'extrémité inférieure à la veine d'un animal.

Lorsque le sang avait ruisselé suffisamment longtemps sur les parois du tube, on analysait le gaz intérieur : la tension de l'oxygène était la tension cherchée (2).

Léon Frédéricq trouva des chiffres voisins de 112 millimètres pour la tension de l'oxygène dans le sang artériel.

Les éléments anatomiques sont donc plongés dans des liquides où normalement existe une tension d'oxygène de 112 millimètres ; ils sont adaptés à cette tension, c'est-à-dire que, dans ces conditions, ils prennent l'oxygène qui leur est offert suivant leurs besoins. Que cette tension vienne à varier

(1) *Centralblatt für Physiol.*, t. VII, p. 33, 1893.

(2) En réalité, comme le sang dégage très lentement son oxygène, on avait mis dans le tube un mélange d'oxygène, de CO^2 et d'azote dans lequel la proportion d'oxygène était un peu inférieure à celle qu'on soupçonnait exister dans le sang d'après des expériences antérieures ; le sang n'avait plus qu'à compléter cette tension de l'oxygène.

légèrement, les éléments anatomiques s'en accommodent; mais si ces variations deviennent par trop accentuées dans un sens ou dans l'autre, le fonctionnement des éléments anatomiques sera vicié. Or, lorsque la pression de l'oxygène du milieu ambiant diminue, que devient la tension de l'oxygène du sang? On n'a malheureusement pas fait d'expériences de tonométrie dans ces conditions, mais les travaux de Hüfner (1) et les formules qu'il a données permettent de connaître, sinon la valeur absolue de la tension de l'oxygène du sang aux différentes pressions, du moins le sens dans lequel varie cette tension.

En effet, en désignant par

p_0 cette tension,
h_0 le poids d'oxyhémoglobine qui subsiste dans l'unité de volume de la dissolution au moment où l'équilibre est atteint,
h_r la quantité d'hémoglobine qui a pris naissance,
K une constante, on a :

$$p_0 = \frac{h_0}{K \times h_r}.$$

Or, les analyses du sang ont prouvé qu'à mesure que la pression diminuait h_r augmentait et h_0 diminuait; il en résulte donc que p_0 diminue quand diminue la pression de l'oxygène respiré. Il arrive un moment, quand on soumet un animal à la décompression, où p_0 atteint une valeur si faible que les éléments anatomiques ne peuvent plus utiliser cet oxygène à si faible tension; c'est le moment où l'animal tombe en syncope.

Influence de la fatigue sur l'apparition du mal des montagnes.— Nous avons vu que tous les ascensionnistes d'une caravane n'étaient pas pris en même temps des accidents du mal des montagnes, et c'est un fait bien connu des alpinistes, que les personnes non habituées à la montagne, qui ne ménagent pas leurs forces au début de l'ascension, sont prises bien plus tôt que les autres en arrivant dans la zone des hauteurs. Même remarque à propos des porteurs : toute dépense d'énergie semble donc prédisposer au mal des montagnes.

Et la théorie devait, en effet, bien faire prévoir qu'il doit en être ainsi.

Toute dépense d'énergie entraîne une consommation d'oxygène, Or, nous venons de voir que, lorsque la pression diminue, la tension de l'oxygène qui entoure la cellule est très faible; les choses vont bien tant que la cellule dépense cet oxygène avec parcimonie; mais, dès qu'elle est obligée pour son fonctionnement d'en consommer une quantité notable, la tension de cet oxygène qui entoure la cellule diminue et tombe à une valeur qui le rend inutilisable.

Ainsi s'explique l'influence de la fatigue; ainsi s'expliquerait également l'influence du froid signalée plus haut, et cette remarque que la limite des neiges éternelles est précisément la zone où débute le mal des montagnes.

L'expérience suivante de M. Regnard (1) vient confirmer ces vues :

Une grande cloche Cl (fig. 581), dans laquelle on peut faire le vide au moyen

(1) Regnard, *La cure d'altitude*, p. 119.

d'une trompe T, contient une roue R qui peut être mise en mouvement à des vitesses variables par un petit moteur électrique M. Un manomètre P indique à chaque instant la valeur de la pression de l'air dans la cloche.

Deux cobayes sont placés dans la cloche, l'un dans la roue, l'autre à côté. On met le moteur en mouvement, le cobaye qui est placé dans la roue est obligé de courir. On fait alors un vide progressif au moyen de la trompe. A partir de 3000 mètres, le cobaye qui est dans la roue commence à manifester

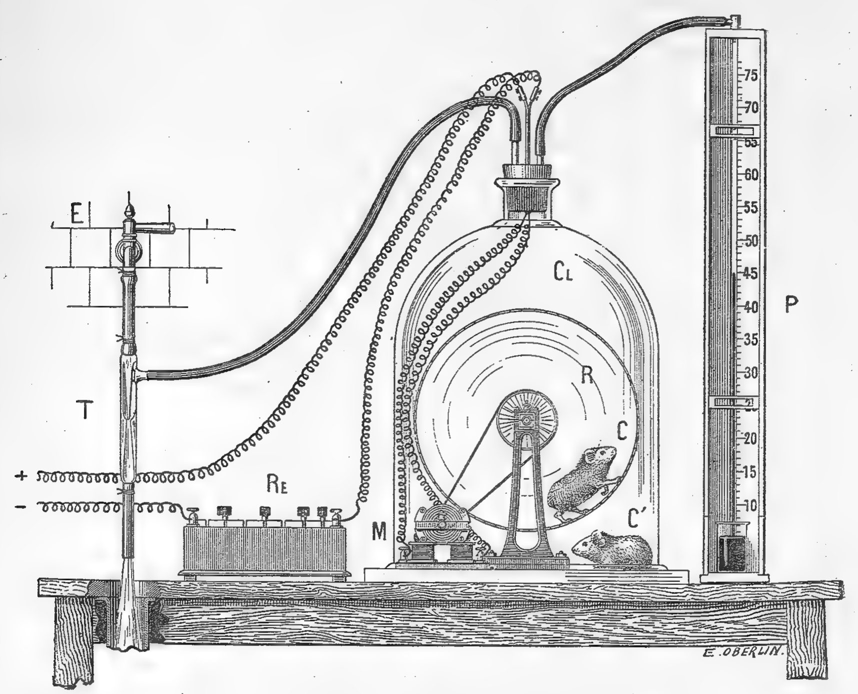


Fig. 581. — Appareil de P. Regnard pour montrer l'influence de la fatigue sur la production du mal de montagne.

une certaine gêne, il trébuche à chaque instant. A une dépression qui correspond à 4600 mètres (hauteur du mont Blanc), le cobaye de la roue se laisse tomber sur le dos, ne remue plus les pattes et se laisse traîner par le moteur.

Pendant ce temps, le cobaye qui est en dehors de la roue est parfaitement calme et ne semble ressentir en aucune façon les accidents qui ont atteint son compagnon.

C'est seulement à 8000 mètres (hauteur de l'Himalaya) qu'il manifeste des troubles graves, qu'il chancelle et écume. On laisse rentrer l'air dans la cloche, les deux animaux reviennent à eux, mais le cobaye de la roue est beaucoup plus long à se rétablir complètement.

Ainsi est démontrée d'une manière irréfutable l'influence de la fatigue sur l'apparition du mal des montagnes.

Acclimatement à l'altitude. — Jourdanet, pendant ses voyages dans les Andes, avait été frappé de la déchéance physique présentée par les habitants de ces contrées; il l'avait attribuée à l'anoxyhémie chronique dont il les pensait atteints. Mais ce n'est pas là un fait général : les habitants de toutes les contrées élevées ne présentent pas cette misère physiologique qui avait frappé Jourdanet et sur laquelle sa théorie avait été édifiée. Le montagnard de condition aisée et qui a en abondance une nourriture substantielle est, au contraire, un homme remarquablement vigoureux; on ne saurait donc attribuer à l'anoxyhémie chronique la déchéance des populations étudiées par Jourdanet; il faut l'attribuer à la pauvreté et à la mauvaise hygiène dans laquelle vivent ces habitants des hauts plateaux des Andes. D'ailleurs, les animaux de ces mêmes contrées, qui sont soumis aux mêmes conditions physiologiques, qui respirent le même air, les lamas, les vigognes, les alpacas, sont très vigoureux et fournissent sans fatigue une somme considérable de travail.

Mais si la théorie de Jourdanet n'est pas soutenable, si l'animal transporté de la plaine à une grande altitude cesse au bout d'un temps très court d'éprouver une difficulté particulière à accomplir des efforts un peu pénibles, par quel mécanisme peut-il donc s'adapter aux nouvelles conditions dans lesquelles il est placé? Quelles modifications l'organisme de ces animaux subit-il sous l'influence de la diminution de pression de l'oxygène? Les travaux de P. Bert vont encore nous le dire.

Augmentation de la quantité d'hémoglobine du sang. — P. Bert fit l'hypothèse que la quantité d'hémoglobine contenue dans un volume donné de sang avait augmenté chez les animaux transportés aux hautes altitudes.

Il procéda donc à l'analyse du sang d'animaux vivant au voisinage de la Paz (4000 mètres environ d'altitude). Voici les chiffres donnés par ces expériences :

	Centim. cubes.
Vigogne	19,3
—	19,0
Lama mâle	21,6
Alpaca	17,0
Cerf	21,4
Viscache	16,2
Mouton	17,0
Porc	21,6

Ils montrent que la quantité d'oxygène mesuré à 0° et à 760 millimètres, contenue dans 100 centimètres cubes du sang considéré agité à 15°, oscille autour de 20 centimètres cubes. Or, d'après les recherches du même auteur, les herbivores vivant au voisinage de la mer ont un sang qui, traité de la même manière, ne fournit que 10 à 12 centimètres cubes d'oxygène pour 100 centimètres cubes de sang.

On est donc en droit de conclure de ces expériences que la quantité d'hémoglobine du sang des animaux des altitudes est sensiblement plus forte que celle des animaux de la plaine.

C'est ce que vont encore affirmer les recherches suivantes.

Expériences de Müntz (1). — Müntz transporte en août 1883 des lapins sur le sommet du pic du Midi (2877 mètres). Au mois d'août 1890, il sacrifie les lapins issus des premiers après plusieurs générations et il analyse comparativement le sang de ces lapins et le sang de lapins vivant dans la plaine.

Voici les moyennes des résultats :

	Densité.	Matières fixes pour 100.	Fer métallique pour 100 gr. de sang.	Oxygène absorbé par 100 gr. de sang.
Lapins du pic du Midi.....	1060,1	21,88	70mgr,2	17,28
— de la plaine........	1046,2	15,75	40mgr,3	9,56

L'augmentation des matières fixes, et surtout l'augmentation du fer du sang des lapins du Pic, prouvent nettement que l'hémoglobine du sang de ces animaux s'est accrue.

Le même auteur veut vérifier si un espace de temps aussi long (sept ans) n'est pas nécessaire pour produire les modifications mises en évidence dans le sang des animaux transportés aux grandes altitudes. Il pratique donc l'examen comparatif du sang de moutons de la plaine et de moutons transportés sur la montagne entre 2300 et 2700 mètres d'altitude, depuis six semaines environ.

Voici encore les moyennes des résultats obtenus dans ce cas :

	Densité.	Matières fixes pour 100.	Fer métallique pour 100 gr. de sang.	Oxygène absorbé par 100 gr. de sang
Moutons de la montagne...	1053,2	18,19	60mgr,4	17,47
Moutons de la plaine......	1038,0	13,58	32mgr,5	7,32

Cette dernière expérience prouve donc que l'enrichissement du sang en hémoglobine se fait rapidement.

Influence de la quantité d'hémoglobine du sang sur la respiration des tissus. — Au point de vue de la respiration des tissus, quel va être le résultat de cet enrichissement du sang en hémoglobine?

Comme nous l'avons montré, c'est la diminution de tension de l'oxygène qui entoure la cellule qui vicie son fonctionnement ; l'augmentation du taux de l'hémoglobine du sang va-t-elle donc avoir pour conséquence un accroissement de la tension de l'oxygène? Ce n'est pas du tout évident *à priori*, et c'est encore aux recherches de Hüfner que nous devons la connaissance de ce fait. Cet auteur, en effet, opérant comme nous l'avons dit, avec des solutions d'hémoglobine, a prouvé que la tension de dissociation de l'oxyhémoglobine n'était pas influencée seulement par la température et la pression, mais encore par le titre de la solution (2) d'hémoglobine.

Ainsi, lorsque la pression barométrique est égale à 447,1, ce qui correspond à peu près à l'altitude de la Paz, si la température est de 45°, on a les proportions centésimales suivantes d'hémoglobine et d'oxyhémoglobine pour des tensions variables en hémoglobine de la solution.

(1) Müntz, De l'enrichissement du sang en hémoglobine suivant les conditions d'existence *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 2 févr. 1891, p. 298).

(2) Voy. l'excellente mise au point de la question par Lambling, *loc. cit.*

	Hémoglobine.	Oxyhémoglobine.
Solution à 4 p. 100	3,33	96,67
— 6 —	2,77	97,23
— 14 —	2,35	97,65

On voit que, toutes les autres conditions restant fixes, quand la solution s'enrichit en hémoglobine, la proportion d'oxyhémoglobine augmente et la proportion d'hémoglobine réduite diminue.

Reportons-nous maintenant à la formule qui donne la valeur de la tension de l'oxygène dans le sang :

$$p_0 = \frac{h_0}{K \times h_r}.$$

On voit que lorsque h_0 augmente et h_r diminue, p_0 croît. Ainsi, à mesure que la richesse en hémoglobine du sang augmente, la tension de l'oxygène croît, c'est-à-dire que les éléments anatomiques recouvrent leur facilité habituelle à consommer l'oxygène. Nous avons saisi le mécanisme intime de l'adaptation de l'organisme aux altitudes (1).

Théorie de l'hypercythémie. Recherches de Viault. — Mais comment le sang parvient-il à s'enrichir en hémoglobine? Puisque cette substance est tout entière fixée sur le globule, elle ne peut augmenter que par deux procédés : ou bien chaque globule se charge d'une quantité plus forte d'hémoglobine, ou bien le nombre des globules augmente. L'expérience prouve que c'est la seconde hypothèse qui est la vraie.

Viault (2), faisant la numération des globules de son propre sang, trouve :

	Dans 1 millim. cube de sang.
A Lima, 4 octobre 1889	5.000.000 de globules.
A Harococha, 19 octobre 1889	7.100.000 —
— 27 —	8.000.000 —

Ainsi, sous l'influence du climat d'altitude, le sang de Viault avait augmenté, en quinze jours, de 2100000, et au bout de vingt-trois jours, de 3 millions de globules.

La numération des globules d'un grand nombre d'habitants des altitudes lui a toujours fourni des nombres très élevés (de 6500000 à 9000000).

Même résultat pour le sang des animaux; une jeune chienne vigoureuse avait 9 millions de globules, un lama 16 millions.

Viault fait une seconde recherche. Il analyse à Bordeaux le sang de différents animaux (chien, chat, cobaye, lapin, coq, poule) au point de vue du nombre des globules, puis il les expédie à l'observatoire du pic du Midi

(1) Il n'est pas prouvé que l'hémoglobine qui imprègne le globule se comporte au point de vue des phénomènes qui nous occupent comme une solution d'hémoglobine dans l'eau distillée. — Nous ne considérons donc pas l'explication que nous venons de donner comme une démonstration irréfutable. — Il y aurait intérêt, comme nous l'avons déjà fait remarquer, à étudier la tonométrie du sang d'animaux soumis à la dépression.

(2) Viault, Sur l'augmentation considérable du nombre des globules du sang chez les habitants des hauts plateaux de l'Amérique du Sud (*Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 15 déc. 1890, 2 févr. 1891). — Action physiologique des climats de montagne (*Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 27 juin 1892).

(2877 mètres). Une nouvelle analyse, faite au bout de quelque temps, montre une augmentation notable du nombre des globules.

	A Bordeaux par millimètre cube.	Au pic du Midi par millimètre cube.
Lapine adulte	4.520.000	6.440.000
Lapin jeune	5.370.000	7.460.000
Cobaye	4.600.000	5.200.000
Coq	2.760.000	3.660.000
Poule	2.800.000	3.760.000
Caille	3.490.000	3.740.000
Coq du pic	»	3.800.000

De plus, Viault fait une remarque importante : il constate que le sang des animaux nouvellement arrivés à cette altitude contient beaucoup de jeunes globules, de globulins ; au contraire, le sang des animaux acclimatés au pic du Midi ne contient pas de globulins, bien qu'il contienne un nombre de globules dépassant de beaucoup la normale.

Viault a donc saisi sur le fait la néoformation des globules.

Expériences de laboratoire. Travaux de P. Regnard. — Lorsqu'on transporte un animal de la plaine sur une haute montagne, beaucoup de facteurs peuvent varier en même temps (pression, température, etc.). Auquel de ces facteurs est dû l'hypercythémie ? Il semble bien que ce soit à la variation de pression, mais l'expérience seule peut décider.

Un cobaye est placé dans une cloche C hermétiquement close (fig. 582). La trompe T fait le vide dans la cloche. La pression est maintenue automatiquement à la valeur choisie par le dispositif suivant. L'air pénètre dans la cloche par la voie ZRZ′; R est un robinet au noyau duquel est fixé un long fléau. A une extrémité du fléau est attaché un poids fixe P′, à l'autre extrémité un réservoir P qui contient du mercure et qui communique avec un autre réservoir situé plus haut, A. Le réservoir A est lui-même relié à la cloche par un tube de caoutchouc.

Lorsque, par le jeu de la trompe, le vide de la cloche dépasse la valeur qu'il devrait avoir, un peu trop de mercure monte en A, le contre poids P n'est plus assez lourd, P′ entraîne le fléau et ouvre le robinet. Au contraire, par le jeu des contrepoids, le robinet se ferme automatiquement et l'arrivée de l'air est interrompue lorsque la pression est revenue à la valeur qu'elle doit avoir. En réglant convenablement la hauteur du réservoir A, on maintient dans la cloche la pression voulue. Par le dispositif figuré, on nettoie facilement la cloche et on renouvelle la nourriture.

M. Regnard a pu ainsi faire vivre un cobaye pendant un mois sous une dépression correspondant à une altitude dès 3 000 mètres.

En faisant la détermination de la capacité respiratoire du sang de cet animal, on a trouvé que :

100 centimètres cubes de sang absorbent 21 centimètres cubes d'oxygène, tandis que pour un cobaye en liberté dans le laboratoire :

100 centimètres cubes de sang absorbent 14 à 17 centimètres cubes d'oxygène.

La diminution de pression suffit donc à augmenter la quantité d'hémoglobine du sang.

Expériences dans les Alpes. Travaux d'Egger (1). — Les recherches d'Egger ont été faites à Arosa (1 860 mètres). Ses déterminations sont faites avec beaucoup de soin ; en voici les principaux résultats :

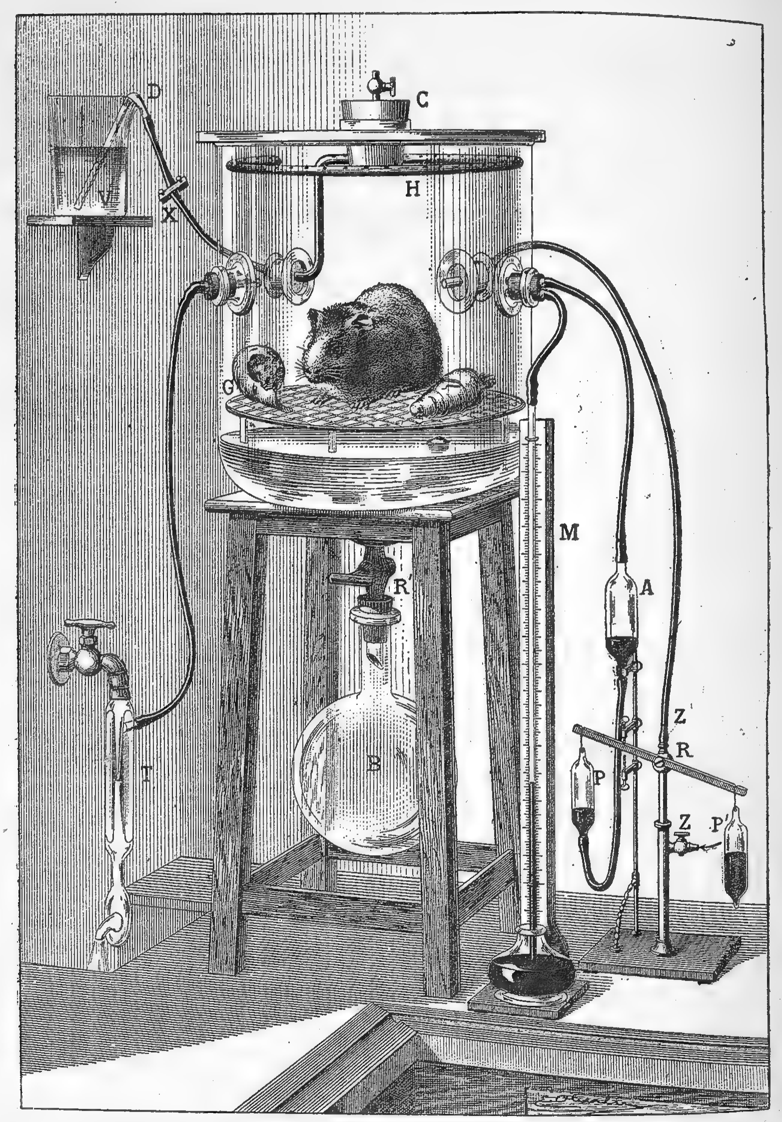


Fig. 582. — Dispositif de P. Regnard pour maintenir un animal pendant très longtemps, sous une dépression barométrique réglée.

1° Le nombre des globules rouges augmente quand un individu passe de la plaine à la montagne ;

2° Son sang s'enrichit aussi en hémoglobine; mais l'enrichissement en

(1) *Beobachtungen an Menschen u. Kaninchen über den Einfluss des Klimas von Arosa auf das Blut.*

hémoglobine ne se produit que postérieurement à l'augmentation du nombre des globules. C'est du reste ce qui se passe aussi après une saignée abondante chez l'homme ;

3° Lorsque l'individu redescend à la plaine, le nombre de ses globules retombe à la normale ;

4° Les anémiques arrivant à une station d'altitude voient le nombre de leurs globules augmenter, mais lors du retour à la plaine le nombre de ces globules ne redescend-il pas au-dessous de la moyenne ? C'est ce qu'Egger n'a pu vérifier ;

5° Les observations des médecins de Davos montrent que chez les personnes âgées et chez certains malades (leucémiques), les organes formateurs du sang ne sont plus capables de produire des globules; il n'y a pas chez eux d'hyperglobulie et le séjour dans la montagne ne leur est pas favorable.

Recherches de Mercier (1). — Elles ont été faites également à Arosa; elles confirment celles d'Egger ; elles nous montrent de plus la soudaineté avec laquelle se fait l'augmentation des globules. Ainsi Mercier, examinant le sang de Mlle D..., a trouvé que cinq heures après son arrivée à Arosa

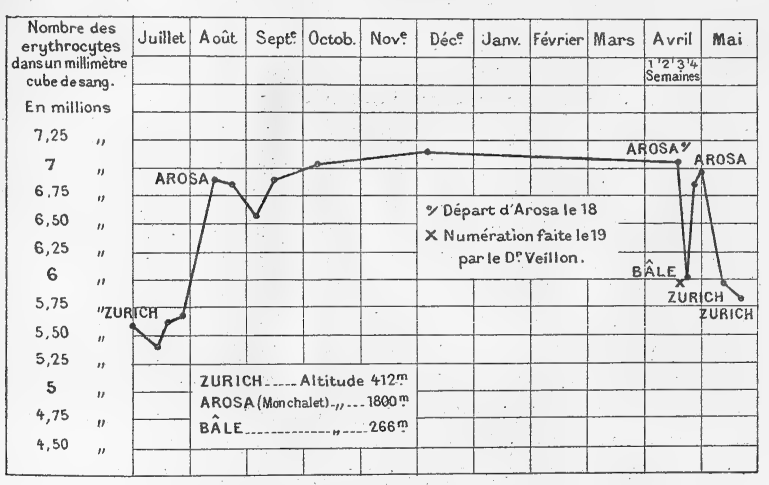


Fig. 583. — Courbe montrant les variations subites du nombre des érythrocytes concordant avec celles de l'altitude.

l'augmentation était de 1 190 000. Cette augmentation est bien réelle, car on constate dans le sang l'apparition d'un nombre considérable de microcytes. L'augmentation d'hémoglobine ne se produit qu'ensuite.

Les érythrocytes adultes sont eux-mêmes plus petits qu'à la plaine. Après un long séjour sur la montagne, la descente à la plaine amène, en peu de temps, une diminution considérable des globules.

Travaux de Miescher. — Il confirme les résultats précédents, mais les recherches entreprises à son instigation montrent que de faibles altitudes suffisent pour produire l'augmentation du nombre des globules. L'auteur se livre à des considérations théoriques sur la formation des globules sous l'in-

(1) Mercier, Des modifications de nombre et de volume que subissent les érythrocytes sous l'influence de l'altitude (*Arch. de physiol.*, oct. 1894, p. 769).

fluence de l'altitude; il pense que la néoformation des érythrocytes dans les organes hématopoiétiques est un phénomène de défense de l'organisme sous l'influence du manque ou plutôt de la diminution de tension de l'oxygène.

Recherches de Sellier. — L'auteur, en maintenant des oiseaux soit dans une atmosphère pauvre en oxygène, mais à la pression normale, soit dans de l'air ordinaire, mais à une faible pression, a vu le nombre des globules augmenter; il a constaté en même temps la production de globulins.

Atmosphères suroxygénées. P. Regnard (1). — La diminution de pression produit une augmentation du nombre des globules, les expériences précédentes l'ont surabondamment prouvé. La réciproque est-elle vraie?

En d'autres termes, l'augmentati on de pression ou l'enrichissement de l'atmosphère en oxygène produit-il une diminution du nombre des globules?

Les expériences suivantes le prouvent. On fait vivre des tourterelles dans de l'oxygène pur à la pression normale, ce qui revient à faire vivre ces animaux dans de l'air à 5 atmosphères. Toutes précautions d'asepsie sont prises pour que l'animal ne s'infecte pas; l'oxygène de l'enceinte est renouvelé chaque jour et un jeu de pipettes fonctionnant automatiquement privent l'atmosphère d'acide carbonique.

Dans ces conditions :

1° Le nombre des globules diminue dans des proportions importantes (diminution de 470 000, 1 316 000). Cette diminution s'établit progressivement et s'échelonne sur une durée d'une huitaine de jours; elle ne se manifeste pas brusquement comme l'augmentation due à la dépression. C'est à ce fait qu'on doit attribuer les résultats contraires de Sellier qui, soumettant des oiseaux à des atmosphères suroxygénées, n'observait pas une diminution notable des globules ; son expérience durait trop peu de temps (seulement quelques jours) ;

2° Au bout de huit ou neuf jours, dans toutes les expériences, la tourterelle est prise de convulsions et meurt en hypothermie ;

3° Un peu avant que la mort n'arrive, on observe une diminution dans la consommation d'oxygène ;

Action de l'altitude sur la nutrition. — 1° *Respiration.* — La fréquence des mouvements respiratoires est augmentée. Leur amplitude varie-t-elle aussi? La question n'a pu être absolument résolue, mais il est probable qu'elle reste normale (P. Bert et Regnard, expériences du laboratoire de la Sorbonne au moyen, des cloches doubles). Veraguth, comptant ses propres respirations à la montagne, a trouvé que le nombre des inspirations faites pendant une minute augmentait à mesure qu'on s'élevait; cette augmentation durait une huitaine de jours pour diminuer ensuite progressivement et retomber à la normale.

Les observations de Weber, Jaccoud, Mercet, Mermod confirment ces résultats. Au début, l'organisme lutte contre la diminution d'oxygène en accroissant la fréquence des mouvements respiratoires; il parvient, en effet, par ce moyen à relever la pression de l'oxygène dans l'air alvéolaire et par suite la tension de l'oxygène dans le sang. Dès que la néoformation

(1) P. Regnard, *Cure d'altitude*, p. 161.

d'hémoglobine s'est produite, la respiration reprend son rythme normal.

2° *Ventilation pulmonaire.* — Comme Veraguth a pu le vérifier à Saint-Moritz au moyen du spiromètre de Bellangé, la ventilation pulmonaire suit la même marche que la fréquence des mouvements respiratoires ; elle croît, reste stationnaire, puis revient à peu près à la normale.

3° *Circulation.* — a. *Nombre des pulsations.*— Il est augmenté non seulement pendant l'effort, mais même au repos (Observations des aéronautes, de Veraguth à Saint-Moritz, expériences du laboratoire de la Sorbonne).

Comme pour la respiration, le nombre des pulsations, après avoir atteint

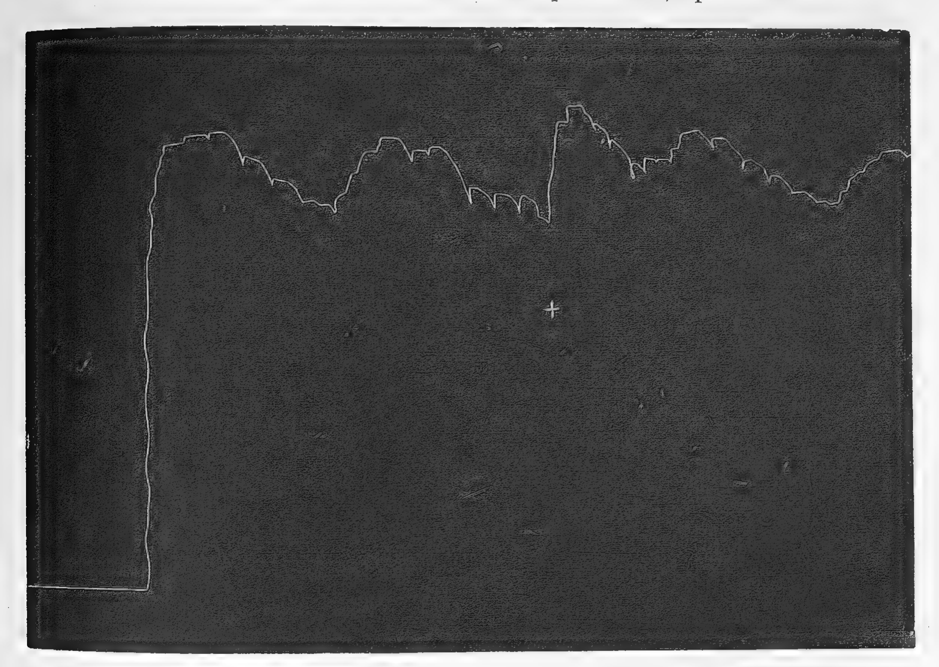


Fig. 584. — Tracé pris avec l'hémodynamomètre différentiel. Il démontre qu'au moment d'une chute brusque de la pression atmosphérique (25 cent. de mercure), la tension artérielle n'est pas modifiée (1).

un certain maximum qu'il conserve quelque temps, décroît ensuite progressivement et retombe à la normale.

Forel a pu prendre des tracés sphygmographiques sur lui-même au Riffel (2 780 mètres). Ces tracés montrent bien l'accroissement du nombre des pulsations et la diminution de leur amplitude, surtout lorsque le sujet est atteint du mal des montagnes.

b. *Tension artérielle.* — Il est admis et répété par tous les pathologistes et bon nombre de physiologistes, que la pression du sang est augmentée lorsque diminue la pression extérieure. C'est la conséquence d'une conception physique erronée que nous avons déjà combattue. Cette erreur, qui s'est beaucoup répandue, veut expliquer les prétendues hémorragies qui se produiraient

(1) On a provoqué la chute de pression au moment où le style était sur la génératrice de la croix.

fréquemment chez les ascensionnistes, les aéronautes et surtout chez les cardiaques et phtisiques, à leur arrivée et pendant leur séjour à la montagne. Or, ces hémorragies des aéronautes et des ascensionnistes n'existent pas en réalité (sauf celles de la membrane du tympan qui ont une cause spéciale). D'autre part, un examen impartial des faits montre que les phtisiques n'ont pas plus fréquemment d'hémoptysies à la montagne qu'à la plaine.

Enfin, l'expérience directe (1), faite au moyen des cloches de P. Bert sur un chien dont la carotide était en rapport avec un hémodynamomètre, montre que la pression artérielle n'augmente pas même au moment où une dépression brusque se produit (chute de la pression atmosphérique de 750 à 500 millimètres) (fig. 584).

4° *Combustions organiques. — Production de CO².* — P. Bert, en laissant mourir dans une atmosphère confinée des animaux, note qu'après la mort de l'animal on trouve dans l'espace clos d'autant plus d'oxygène non brûlé, et

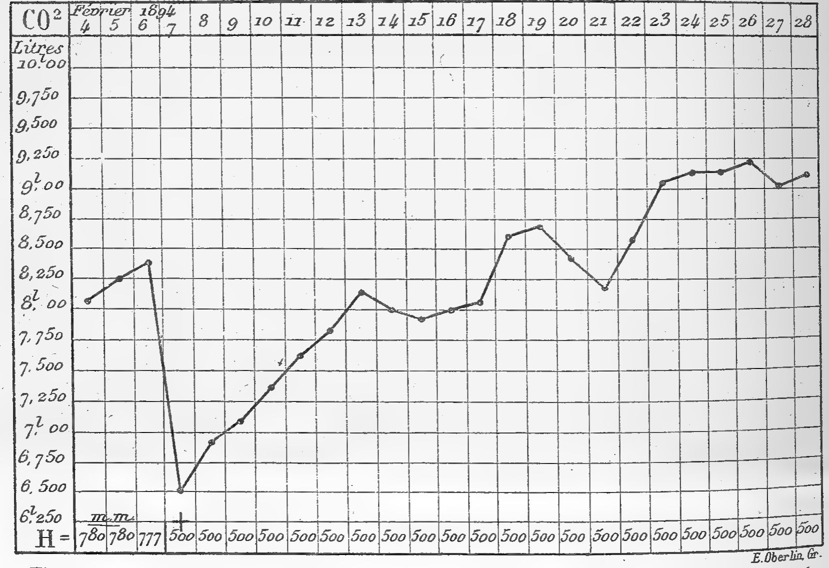


Fig. 585. — Graphique représentant la quantité de CO² produite par un animal laissé longtemps à une dépression correspondant à une altitude de 3 000 mètres.

qu'il s'est formé d'autant moins d'acide carbonique que, la pression initiale de l'oxygène dans l'espace clos était plus faible.

Ces expériences tendraient donc à prouver que les combustions diminuent à mesure que baisse la pression de l'oxygène, mais les animaux se trouvaient dans des conditions si anormales, qu'on ne peut tirer aucune conclusion ferme de ces expériences.

Veraguth, Mercet, dosent l'acide carbonique exhalé par des personnes habitant les altitudes, et ils constatent que les combustions sont augmentées ; mais ces expériences sont sujettes à critique.

Sellier soumet des animaux à une dépression déterminée ; il constate

(1) Regnard, *Cure d'altitude*, p. 183.

qu'au début les combustions sont ralenties, mais bientôt elles remontent à la normale et arrivent à la dépasser.

Regnard (1) a repris ces recherches, mais en ayant soin de faire porter les expériences sur un grand nombre de jours et de doser tout l'acide carbonique produit, afin de ne pas être obligé de multiplier par un coefficient considérable les inévitables erreurs d'analyse.

L'appareil employé était celui de la page 1088 : mais avant d'entrer dans la cloche, l'air se débarrassait de son acide carbonique et de sa vapeur d'eau en passant dans des flacons à potasse caustique et à acide sulfurique.

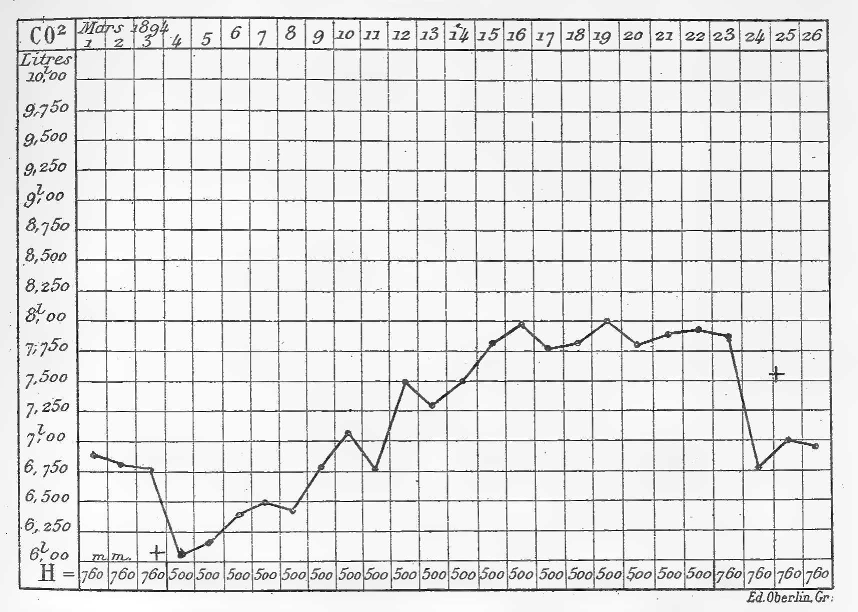


Fig. 586. — Graphique représentant la production d'acide carbonique d'une tourterelle maintenue à une dépression correspondant à une altitude d'environ 3 000 mètres.

En sortant, l'air traversait une série de barboteurs renfermant de la potasse qui absorbait tout l'acide carbonique produit par l'animal; un flacon témoin placé à la suite des barboteurs à potasse, et renfermant de l'eau de baryte, montrait, en restant limpide, que tout l'acide carbonique avait bien été absorbé.

Les animaux employés étaient des tourterelles ; on les laissait dans l'appareil environ vingt-cinq jours. Chaque jour, on enlevait les barboteurs à potasse et on y dosait l'acide carbonique produit. Ces barboteurs étaient, d'ailleurs, immédiatement remplacés par d'autres contenant de la potasse n'ayant pas servi.

Résultats. — Les animaux sont d'abord laissés pendant deux jours dans la cloche à la pression ordinaire ; on détermine l'acide carbonique produit, puis, brusquement, on fait tomber la pression à 500 millimètres : on cons-

(1) Regnard, *Cure d'altitude*, p. 186.

tate alors une diminution instantanée dans la production de CO^2 ; mais cette diminution ne persiste pas, et la production de CO^2 augmente, atteint la valeur qu'elle avait à la pression normale et la dépasse même. Si, à ce moment, on vient à ramener la pression à la normale, la production de CO^2 retombe elle-même à la normale.

En résumé, nous voyons que tant que l'animal n'a pu s'adapter aux nouvelles conditions dans lesquelles on l'a placé, ses combustions sont diminuées, les cellules utilisent mal l'oxygène qui leur est offert sous une tension très faible ; mais, dès que cette tension est remontée à la suite de la néoformation d'hémoglobine, les combustions reprennent leur taux normal et même le dépassent.

5° *Excrétion d'azote.* — Les seules expériences dont il faille tenir compte à ce sujet sont celles de Veraguth, qui dosait l'urée et l'acide urique qu'il éliminait chaque jour. Voici quels sont ses résultats :

Les premiers jours du séjour aux altitudes, la quantité d'urée diminue considérablement ; elle remonte ensuite un peu, mais reste enfin au-dessous de la normale.

La quantité d'acide urique éliminé ne varie pas sensiblement.

6° *Élimination de la vapeur d'eau.* — Comme on devait s'y attendre, elle augmente lorsque la pression diminue. Regnard, au moyen de l'appareil déjà décrit, dose la vapeur d'eau à la sortie de la cloche au moyen de tubes à acide sulfurique. Il trouve :

1° *Tourterelle de 140 grammes.*

A 760mm, élimination de.................... 5gr,04 d'eau.
500 — .... 9gr,12 —

Donc 4gr,8 de différence.

2° *Tourterelle de 130 grammes.*

A 757mm, élimination de.................... 4gr,31 d'eau.
500 — .... 6gr,72 —

Donc 2gr,42 de différence.

Veraguth, Marcet, opérant sur eux-mêmes, obtiennent des résultats analogues.

7° *Température.* — On ne peut, avec les moyens dont on dispose, découvrir aucune variation nette dans un sens ou dans l'autre.

8° *Variation du poids du corps. Nutrition intime des tissus.* — Il est bien difficile également de se faire une idée précise sur cette question. Si on examine les animaux placés dans les cloches, on constate assez généralement une diminution de poids ; mais n'en serait-il pas de même à la pression ordinaire?

Les observations faites à la montagne par Veraguth, à Saint-Moritz, portent sur des gens qui, dès leur arrivée, changent leur genre de vie (gens d'hôtel surmenés par leur service, touristes qui, d'une vie souvent sédentaire, passent à une vie active) ; d'ailleurs, Veraguth a constaté des variations de poids dans les deux sens ; il est donc bien difficile de connaître l'influence de l'altitude seule sur l'augmentation ou la diminution du poids.

P. Bert a constaté l'apparition de l'hyperglycémie à la suite d'une chute brusque de la pression. Y a-t-il ici un phénomène rappelant l'hyperglycémie produite par l'arrivée dans le foie du sang asphyxique?

L'étude de ces phénomènes demanderait de nouvelles recherches.

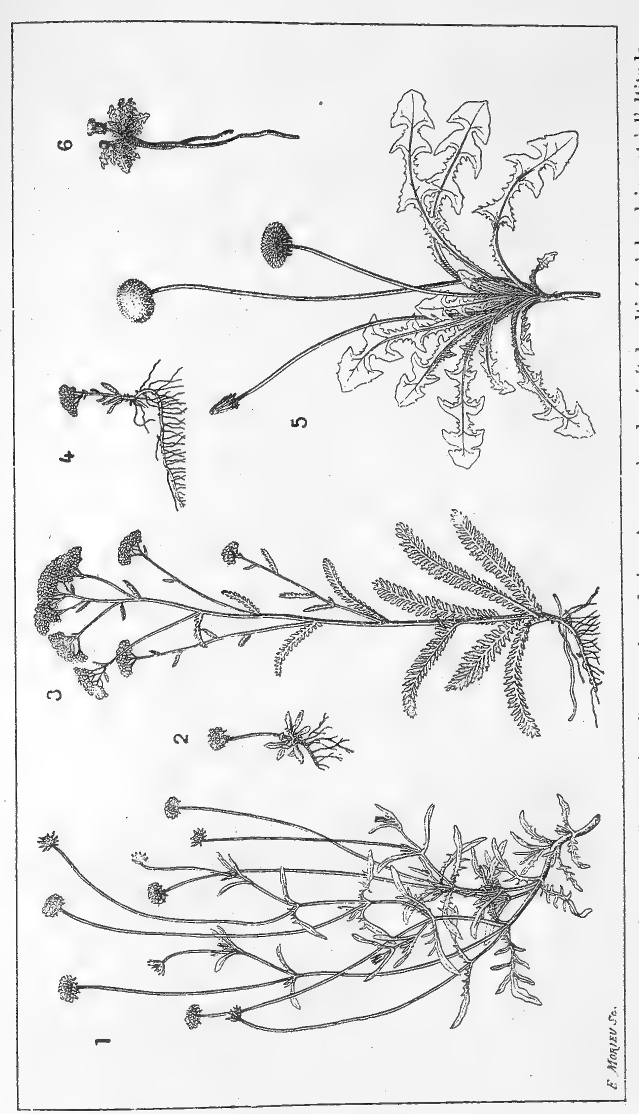


Fig. 587. — Expériences de G. Bonnier. Comparaison de la même espèce de végétal cultivée à la plaine et à l'altitude. Les numéros impairs désignent les plantes cultivées à la plaine; les numéros pairs des échantillons de même espèce cultivés à la montagne.

Influence de l'altitude sur les végétaux. — Le contraste entre la végétation des vallées, celle des premières pentes, d'une part, et celle des sommets, d'autre part, a frappé tous ceux qui ont visité les montagnes. Quelles sont les causes de cette diminution dans l'intensité de la végétation des hautes

altitudes? Faut-il incriminer le dessèchement de la plante sous l'influence de l'augmentation de la transpiration, la diminution de la terre végétale, ou la diminution dans la tension de l'oxygène? Ces trois facteurs interviennent sans doute et concourent à produire, sur la plante, des modifications morphologiques qui ont été bien mises en évidence par M. G. Bonnier.

Des plantes identiques étaient cultivées dans la même terre à Fontainebleau, à Chamonix (1 050 mètres), au Montanvert (1 920 mètres), à l'aiguille du Tour (2 400 mètres), à Cadéac (Hautes-Pyrénées, 740 mètres) et au col de la Paloume (2 050 mètres).

La figure 587 montre les différences saisissantes entre les échantillons d'une même plante cultivés les uns dans la plaine et les autres aux altitudes. Il semble que la partie aérienne des individus cultivés sur les hauts

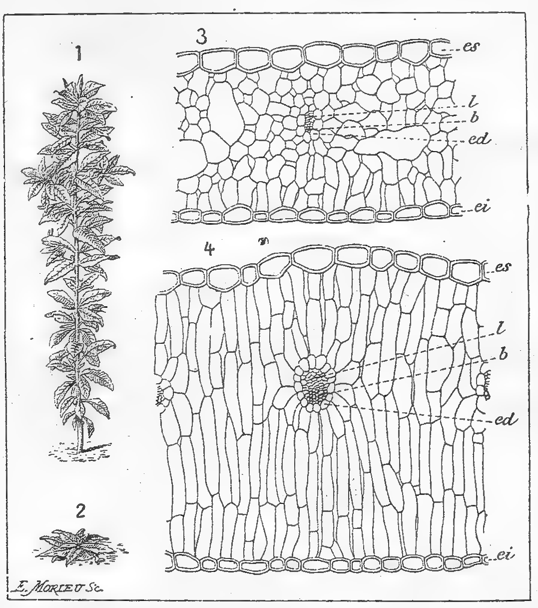


Fig. 588. — Expériences de G. Bonnier. Comparaison de la même espèce du tissu en palissade de la feuille. Épaississement de ce dernier dans la feuille montagnarde.

sommets se soit atrophiée aux dépens de la partie souterraine qui a subi une hypertrophie remarquable.

En même temps, les divers organes de la plante se sont modifiés, ses feuilles sont devenues coriaces, épineuses; le végétal a pris cette apparence spéciale que les botanistes désignent sous le nom d'aspect désertique.

Les modifications histologiques ne sont pas moins frappantes. Si on pratique des coupes des feuilles, on voit que celles des plantes d'altitude sont beaucoup plus épaisses; le tissu en palissade a subi une hypertrophie considérable, la chlorophylle est très abondante. Il semble que nous assistions ici à un phénomène d'adaptation qui serait le pendant de celui que nous avons observé chez les animaux à propos de l'hémoglobine : la plante

paraît lutter contre la diminution de tension de l'acide carbonique, comme l'animal avait lutté contre la diminution de tension de l'oxygène.

Ces expériences nous montrent l'influence de l'altitude en général sur la morphologie et la physiologie de la plante ; elles ne font pas le départ entre

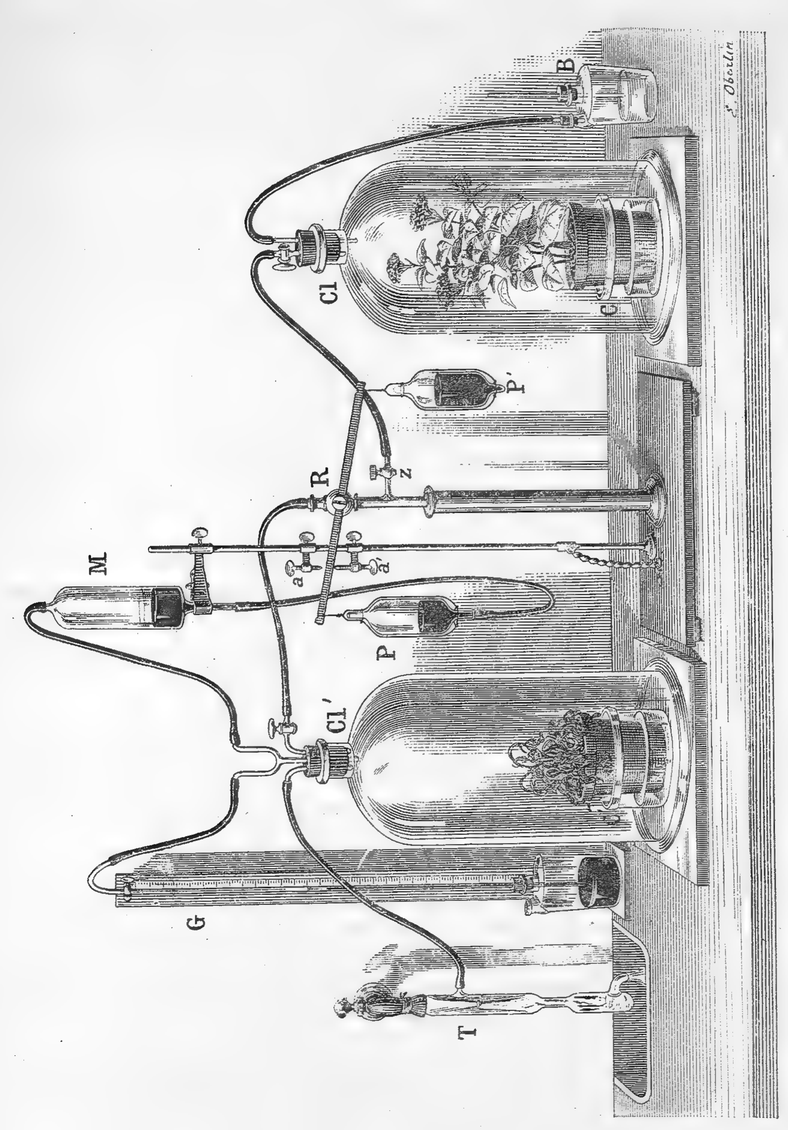


Fig. 589. — Dispositif de P. Regnard pour l'étude de l'influence de l'altitude sur la végétation.

les divers facteurs que nous avons signalés, elles ne nous disent pas en particulier quelle part dans le phénomène revient à la diminution de pression de l'oxygène.

Expérience de P. Bert. — On plaçait des graines en germination sous

des cloches hermétiquement fermées. On diminuait la pression de l'air de la cloche, la germination était sensiblement entravée. Ainsi, à 760 millimètres, la récolte pesait 8 ; à 600 millimètres, elle ne pesait plus que 6; à 500 millimètres, 4 ; à 400 millimètres, 3,5; enfin, elle était nulle à 70 millimètres.

On est donc bien en droit de conclure que c'est la diminution de tension partielle de l'oxygène qui a une influence néfaste sur la végétation.

Un reproche pouvait cependant être adressé aux expériences de P. Bert. En effet, bien que l'air fût renouvelé chaque jour dans les cloches, les plantes qui s'y trouvaient vivaient dans un air confiné : n'était-ce pas là la cause du ralentissement de la végétation?

Expériences de P. Regnard. — Les plantes sont placées sous deux cloches C*l*, C*l'*. Une trompe T fait le vide dans la cloche C*l'* ; la diminution de pression ainsi produite est maintenue automatiquement à une valeur constante par le dispositif déjà décrit; mais ici, l'air n'arrive pas directement du dehors au robinet Z ; il a déjà traversé la cloche C*l* en restant à la pression normale; il s'est, d'ailleurs, saturé de vapeur dans le flacon B avant de pénétrer dans les cloches.

Résultats. — 1° *Germination.* — Elle est considérablement entravée par la diminution de pression (correspondant à la hauteur du mont Blanc, 4 810 mètres), comme le montre un semis de radis fait comparativement sous chacune des deux cloches.

2° *Végétation.* — On place deux plantes adultes (héliotropes), très semblables, sous chacune des deux cloches. Au bout de peu de jours, celle qui est sous la cloche C*l'* (à 410 millimètres) ne tarde pas à se flétrir; ses feuilles se noircissent, se dessèchent, bien que la terre du pot qui la contient soit maintenue constamment humide.

Une plante de montagne (lycopode) résiste un peu plus longtemps, mais finit aussi par se flétrir, se dessécher et mourir vers le vingtième jour. Au contraire, une plante aquatique, immergée dans l'eau, résiste bien, et au bout de vingt jours elle ne présente aucune différence sensible avec le témoin placé dans la cloche C*l*.

Ainsi, nous voyons que si la diminution de tension de l'oxygène intervient surtout dans le ralentissement de la germination étudiée sous une forte dépression, c'est surtout l'augmentation de l'évaporation et le dessèchement consécutif de la plante qui sont nuisibles au végétal adulte. D'ailleurs, M. Müntz a vu que la proportion d'eau des plantes des altitudes était sensiblement plus faible que celle des plantes de la plaine.

Ces faits nous expliquent les modifications observées par M. Bonnier ; la plante subit une hypertrophie de son appareil souterrain qui va puiser l'eau dans le sol ; elle subit, au contraire, une atrophie de ses parties aériennes, afin de ralentir la trop grande évaporation.

Lutte de la plante contre la diminution de tension de l'acide carbonique, et lutte de la plante contre l'accroissement de l'évaporation, tels sont les deux phénomènes qui dominent la biologie des plantes des altitudes.

INFLUENCE DES AGENTS ATMOSPHÉRIQUES

— Température (chaleur, froid); lumière;
état hygrométrique (sécheresse, humidité); électricité; ozone; pesanteur; mouvement; pression; oxygène —

SUR LES ÉLÉMENTS CELLULAIRES

Par A. CHARRIN

A toutes les époques on a cru à l'influence des différents agents atmosphériques sur l'évolution des maladies, en particulier des maladies infectieuses; récemment encore, Solontzeef estimait que l'abaissement de la pression, que l'affaiblissement de l'intensité de la lumière, que les fluctuations thermiques, etc., favorisent l'éclosion du mal.

Aujourd'hui, grâce à l'isolement des bactéries, causes de ces processus morbides, il est possible d'examiner avec plus de précision les modifications que les radiations, que les vibrations aériennes de tout ordre imposent non seulement aux cellules de l'organisme, mais plus encore à ces agents pathogènes. C'est précisément en raison de cette double action et sur le germe générateur des processus et sur le terrain victime de ces atteintes pathologiques, que ces études acquièrent tant d'importance, qu'elles forcent pour ainsi dire l'attention des observateurs ; jadis on groupait ces influences, analysées avec soin il y a peu de temps par Jessen, Eijkmann, Ferraro, Berger, etc., sous la dénomination de *génie épidémique*.

Végétaux ou animaux, les êtres de ces deux règnes subissent l'intervention de ces éléments frigorifiques, calorifiques, mécaniques ou lumineux, etc. ; les minéraux eux-mêmes ne sont pas absolument affranchis, attendu que les pierres connaissent les conséquences des gelées, des sécheresses, de l'électricité des espaces, etc. — Les plantes, en particulier, dépendent avant tout des oscillations de la température ; leur végétation n'est possible que si le thermomètre se maintient entre certaines limites, d'ailleurs variables tant avec les espèces qu'avec le développement de plusieurs d'entre elles. Quand, en effet, on dépasse une de ces limites, la vie s'arrête, se suspend ; toutefois, il convient habituellement d'aller bien au delà, lorsqu'on désire supprimer totalement ce mouvement vital. Si, au contraire, on se meut sans se trouver jamais ni en deçà ni au delà, on découvre ordinairement une zone, fréquemment comprise entre 25 et 40°, éminemment propice à l'évolution des infiniment petits.

Le plus grand nombre de ces infiniment petits présente au froid une résistance considérable. — Déjà Pasteur avait remarqué que certains microbes supportent aisément un abaissement de — 30°; Frisch a pu conserver des germes placés dans un liquide refroidi à — 112°, à la condition de ne pas revenir brusquement à l'optimum; à — 125°, d'après Pictet et Yung, des graines, des œufs d'Invertébrés, des bacilles tels que le *Subtilis*, des microcoques comme le *Luteus* ne sont pas fatalement anéantis : on a pu atteindre — 160°. Par contre, les bactéridies charbonneuses et quelques autres agents succombent, dès qu'on dépasse cet abaissement.

A dire vrai, il importe de tenir grand compte de différents éléments, de la nature des espèces ou de leur état, de la durée ou de l'intensité du refroidissement, etc. — A — 65°, en prolongeant l'expérience pendant douze heures, d'Arsonval et Charrin ont enregistré une diminution dans la rapidité de reproduction du bacille pyocyanique; la virgule du choléra indien fonctionne pleinement aux environs de + 38°, se multiplie lentement au-dessous de 16°, supporte — 10°, vit avec peine à — 25°; déjà à 0° elle ne survit pas au delà de six jours; le bacille de la peste, suivant Wladimiroff et Kresling, se reproduit assez vite à — 15°. — Si on fait agir ces basses températures sur des êtres un peu plus élevés, on constate, par exemple, avec Cagniard-Latour, que la levure de bière à — 90°, dans un mélange d'acide carbonique et d'éther, conserve son pouvoir de ferment, bien qu'à — 96° d'Arsonval ait vu périr le principe inversif; Schumacher a même reconnu qu'une courte diminution, même jusqu'à — 114°, ne tue pas cette levure. A 0°,5, à 1°, à 2°, l'*Ustilago carbo*, le *Botrytis cinerea*, le *Penicillium glaucum*, etc., à en croire Hoffmann, commencent à entrer en germination.

Ces résistances expliquent comment Frænkel, Prudden, Renk, Montefusco ont décelé des infiniment petits vivants dans la neige, la glace ou la grêle; pourtant il existe des parasites dont le protoplasma dégénère à la suite d'une simple congélation.

En revanche, quelques bactéries pullulent assez abondamment à 0°; c'est le cas d'un bacille court cultivé par Forster, bacille qui croît aisément jusqu'à + 20°, cesse d'être lumineux à 30°, succombe à 38°; c'est aussi le fait d'un microbe légèrement allongé, rencontré par Fischer dans le port de Kiel, microbe producteur de phosphorescence; par contre, dans la mer des Indes, ces micro-organismes générateurs de lumière, pour la plupart, ne supportent pas un abaissement dépassant + 15°.

Il va de soi que la durée d'exposition au froid, que la lenteur du retour à la normale, qu'une série de conditions font varier ces résultats. — Quand on expérimente, plus spécialement sur des bourgeons hibernants de végétaux supérieurs ou sur des graines pauvres en eau, on voit les sucs se concentrer, les éléments aqueux passer à l'extérieur, le protoplasma se contracter; à ce moment, si on élève brusquement la température, des altérations se produisent; parfois la cellule succombe, tandis qu'elle recouvre peu à peu ses propriétés, lorsque cette élévation est progressive. Or, comme les bactéries sont habituellement pourvues de minimes proportions d'eau, on est en droit de leur appliquer de telles considérations.

Peut-être aussi, en présence du peu d'action de quelques refroidissements cependant des plus intenses, — 110°, — 124° et davantage, doit-on songer, pour expliquer ces faits, à des données spéciales d'ordre physiologique, données, il est vrai, en partie hypothétiques. C'est ainsi que telle théorie prétend que l'organisme n'est sensible au froid qu'aux environs de — 30° à — 60° ; si, à l'aide de fourrures, d'enveloppes, on parvient à se défendre contre de pareils abaissements, on est en mesure d'aller au delà : il arrive un moment où les vibrations frigorifiques ne sont plus perçues.

De même, quand d'autres vibrations d'ordre lumineux frappent la rétine, si elles franchissent des limites déterminées, elles cessent d'être parfaitement analysées. Si, par exemple, on promène devant l'œil un point brillant, tout simplement une allumette en ignition, on saisit clairement les positions successives de l'objet ; toutefois, dès qu'on accélère suffisamment ces déplacements, ces positions successives se fondent en une ligne continue, en une traînée. D'autre part, on n'apprécie pas avec précision les nuances, les modulations d'un son trop bas ou trop élevé ; d'autre part, également, une décharge électrique faible provoque une douleur insignifiante ; une augmentation notable dans la puissance du fluide entraîne des accidents quelquefois mortels, tandis que des courants de haute fréquence, doués d'une énergie excessive, sont impuissants, d'après Tesla, d'après d'Arsonval, à intéresser la sensibilité d'une manière accentuée.

D'Arsonval et Charrin ont fait agir l'air liquide sur des germes sans les détruire totalement ; peut-être se forme-t-il dans ces conditions une sorte de couche isolante enveloppante.

C'est donc à un niveau déterminé que les agents extérieurs, que le froid particulièrement, actionnent les êtres vivants de telle ou telle façon ; malheureusement, les conséquences de ces interventions sont fréquemment désastreuses.

On connaît le rôle de ces abaissements thermiques dans la genèse du charbon ; nul n'ignore l'expérience de Pasteur sur la poule baignée, expérience dont le mécanisme, au point de vue de la déchéance organique, est assez complexe. On retrouve cette influence dans une foule de cas, dans des recherches de Lode, de Lipari, de Duersch, de Bouchard, de Cheinisse, de Walter, etc., destinées à montrer que le microbe, dans des conditions spéciales, n'évolue que si on fait fléchir la température ; on rencontre également ce facteur étiologique en dehors de l'expérimentation, dans une série d'observations propres à établir que le refroidissement est capable de favoriser l'éclosion de troubles morbides aussi nombreux que variés : lésions localisées, érythèmes secondaires, anémies des extrémités, gelures, inflammations des muqueuses, affections des voies respiratoires, néphrites, entérites, déterminations sur les séreuses, accès de goutte ou de rhumatisme, névralgies, etc.

En examinant de près les modes d'action de ces basses températures, on comprend plus facilement leur pouvoir morbifique. La vie, en se restreignant, comme l'a signalé Morpurgo dans ses essais de greffe cellulaire, persiste plus longtemps, bien qu'en général cette restriction entraîne des conséquences défectueuses. C'est ainsi que l'isotonie globulaire subit à un haut degré les effets de

ces abaissements thermiques ; les hématies se détruisent ; l'hémoglobine, qui commence par éprouver un retard dans l'activité de réduction de son oxygène, encombre les capillaires, et la graisse, à en croire Czylharz, se forme plus abondamment ; c'est ainsi, d'autre part, que la conductibilité nerveuse, d'après Gotch et Macdonald, diminue de rapidité, passe de 25 à 15, pendant que l'irritabilité se modifie. Or, ces résultats, semble-t-il, sont de nature à éclairer partiellement, au moins, la pathogénie soit de certaines paralysies de la face ou des membres, soit des états douloureux des troncs périphériques. — Récemment, on a mis en lumière les changements imprimés aux grandes cellules nerveuses, à quelques neurones, quand on les soumet aux oscillations de la thermogénèse ; ce sont des diminutions de calorique qui semblent supprimer toute tendance aux mouvements expansifs ou aux déplacements des grains chromatiques ; dans ce cas encore, on ne saurait se défendre d'un rapprochement entre ces constatations et celles qui enregistrent, comme pendant la retraite de Russie, l'affaiblissement de la volonté, de la pensée, de la mémoire, etc., d'un organisme impuissant à se réchauffer.

La fibre musculaire n'échappe pas à cette influence ; sa contraction devient lente, pénible, irrégulière : Marey, Gad et Heymans, Weiss et Carvalho, etc., ont étudié ces modifications.

Nœgeli a vu que, pour parcourir une distance fixée, un grain de protoplasma met 3 secondes à 20°, 8 à 10°, 60 à 0° ; Schultze a fait des observations analogues. Or, si on réfléchit que l'acte le plus intime de la nutrition, que les phénomènes intracellulaires sont liés à ces mouvements, on conçoit à quel point le défaut de chaleur rend cette nutrition torpide, paresseuse ; partant, on comprend plus aisément, avec Krabbe, comment l'intensité de l'assimilation fléchit des deux tiers, si le thermomètre passe de 26 à 7, comment aussi la vitesse de résorption s'amoindrit sensiblement.

Dès qu'on les refroidit, les leucocytes perdent promptement leur activité en quelque sorte motrice, contractile ; il suffit de 4 ou 5 degrés en moins pour les obliger à se réduire, à se replier sur eux-mêmes ; il en résulte pour leurs attributs phagocytaires une véritable souffrance : à ce titre, les défenses de l'organisme sont compromises. Du reste, l'atténuation de la conductibilité, de l'irritabilité du névraxe, l'affaissement des réactions, le relâchement des capillaires, les adultérations humorales, tous ces éléments concourent à détruire ces défenses ; même, à en croire Castets, Lambert, Delezenne. Carrière, etc., on devrait également compter avec les lésions des épithéliums, plus spécialement des cellules des tubuli du rein, par suite avec le manque au moins relatif de diurèse, d'élimination des composés toxiques retenus dans les plasmas. Cette rétention dépend encore du défaut de fonctionnement du revêtement cutané, car, sous l'action de ce refroidissement, les vaisseaux superficiels, les glandes se ferment ; la sueur, les produits sébacés ne conduisent plus d'éléments nuisibles à l'extérieur ; les accidents ressemblent de loin à ceux du vernissage cutané, opération qui, suivant Kianicine, Reiss, Catiano, etc., entraîne l'apparition de corps analogues soit à des ptomaïnes, soit à la pyridine, soit encore au formiate d'ammonium donnant par décomposition de l'acide prussique.

Les changements imposés par la chaleur aux cellules tant organiques que parasitaires sont en général et plus prompts et plus marqués que ceux qui dérivent de la mise en jeu du froid.

A la vérité, les agents pathogènes, aussi bien que les saprophytes, végètent entre des limites assez écartées ; une variété de *Subtilis*, d'après Brefeld, pousse entre 6 et 50°; le *Bacterium termo* de Cohn évolue à partir de 5° pour s'arrêter à 44° ; l'optimum de ce *Subtilis* est à 32°; celui de ce *Bacterium* à 35°. Le *Bacillus amylobacter* se développe de préférence à 41°; les minima du pneumocoque, du bacille de Koch sont à 24 à 28°, tandis que les maxima avoisinent 40-43°; le germe de la maladie de la vigne connue sous le nom de *gelivure* se multiplie à 16°, surtout à 25°, mais on réussit à l'acclimater chez les animaux à 37-39°.

Ces résultats montrent qu'il importe de tenir grand compte de la nature des microbes, de leur provenance, des habitats antérieurs, des milieux de culture, etc.

Olivier, Certes, Garrigou, ont décelé, dans les eaux chaudes de Luchon, de Cauterets, des micro-organismes pullulant à 64°; Van Tieghem a découvert un parasite donnant des spores à 75°; le thermophile de Miquel se reproduit à 72°, celui de Glöbig, celui de Baruchelle supportent jusqu'à 110°.

Les caractères basés sur la comparaison des résistances aux différentes températures ont plus d'une fois permis de séparer entre elles des espèces voisines, en particulier dans le groupe du bacille subtil.

La chaleur comme le froid, comme l'âge, la dessiccation, l'oxygène, la lumière, les antiseptiques, etc., impriment aux infiniment petits des dégradations successives, des diminutions dans la qualité ou l'abondance des sécrétions, des amoindrissements dans la rapidité de la multiplication; puis, la vie elle-même, suivant les doses, la durée, la nature de l'intervention, etc., finit par être compromise. C'est ainsi qu'avec 0,10 de naphtol pour 1000, le bacille pyocyanique ne semble pas atteint; si on porte cette quantité à 0,48 pour 1000, la sécrétion des pigments diminue pour disparaître à 0,64; la pullulation se ralentit à partir de 0,59 pour devenir presque nulle à 0,88; aux environs de 1 p. 1000, toute manifestation vitale passe inaperçue : ce bacille succombe.

A 42°, la bactéridie peut être rendue asporogène; Chauveau a même proposé de la chauffer à cette température de 42°,5 pendant une journée, puis à 47° durant trois heures, pour obtenir un vaccin, que Toussaint s'était efforcé de réaliser en portant à 58° le sang des animaux morts du sang de rate : à la chaleur Pasteur, a substitué l'oxygène.

De tels procédés ont conduit à l'une des plus belles découvertes dont puisse s'enorgueillir la science contemporaine, à la domestication des microbes, à la création de véritables races. C'est qu'en effet ces bactéridies atténuées donnent naissance à des bactéridies également atténuées; il en résulte que l'affection déterminée par leur inoculation est légère, quoique suffisante pour immuniser. — Introduits dans les tissus, ces germes fabriquent des toxines et peu abondantes et peu actives ; ce sont ces toxines qui vaccinent; de sorte qu'en réalité il n'y a pas au fond de réelle différence entre cette immuni-

sation par éléments figurés affaiblis et celle qu'on fait apparaître en injectant des sécrétions bactériennes; dans un cas comme dans l'autre, ce sont ces sécrétions qui agissent; toutefois, elles sont produites tantôt *in vitro*, dans des récipients où l'expérimentateur va les puiser, tantôt dans les tissus, mais elles dérivent toujours de la vie du microbe.

Il est pourtant juste de reconnaître que l'usage de ces races bactéridiennes exige des soins minutieux, car, si cette atténuation est poussée trop loin, l'économie ne ressent aucun effet; si, au contraire, elle n'est pas suffisante, la maladie provoquée peut être grave : de là la préférence donnée aux vaccins solubles, dont l'emploi, en raison de l'impureté des liquides, du mélange des principes nuisibles associés aux substances utiles, n'est pas, malheureusement, absolument dépourvu d'inconvénient.

Quoi qu'il en soit, ces défectuosités de la pratique ne sauraient masquer la beauté de cette découverte, qui permet d'asservir des microbes, de créer en quelque sorte des espèces.

En présence des modifications imposées aux éléments cellulaires par le froid ou la chaleur agissant séparément, on soupçonne bien vite l'influence qui doit appartenir aux passages brusques, répétés, de l'un à l'autre. Aussi, après avoir utilisé et les basses et les hautes températures, après avoir mis en œuvre, d'un côté, les bains refroidis, les applications inférieures à zéro, et, d'autre part, les cautérisations, la révulsion par le fer rouge, etc., la thérapeutique a eu recours, en hydrothérapie, aux douches rafraîchies, puis chaudes, se succédant à de très courts intervalles.

Il importe, quand on désire stimuler les cellules, celles du névraxe en particulier, d'obéir avec soin aux règles établies; il convient, avant tout, de tenir compte de la durée de ces applications, plus encore que du degré. — Malheureusement, on manipule de tels agents sans songer que le même engendre l'énergie ou le surmenage, simplement en prolongeant quelque peu les instants de ces interventions; une minute, des secondes en trop suffisent parfois pour épuiser le pouvoir réactionnel des tissus; l'affaiblissement, l'abattement remplacent l'activité; ordinairement, l'aspect extérieur change quelque peu.

Mendelsohn a vu la forme, la distribution des paramécies varier d'un moment à l'autre, lorsqu'on met chaque extrémité de ces êtres en contact, celle de droite avec un liquide porté à un degré relativement élevé, celle de gauche avec de l'eau fraîche; Zuntz a signalé les oscillations de l'hémoglobine en rapport avec celles du thermomètre; Macdonald a fixé l'étendue des limites entre lesquelles varie l'irritabilité soumise à de pareilles fluctuations thermiques; Arnitri a prouvé que, dans ces conditions, l'oxygène consommé répond à des chiffres assez éloignés les uns des autres.

Le froid exerce sur les toxines une indéniable action; l'influence de la chaleur est encore plus marquée, attendu qu'elle altère, qu'elle détruit avec facilité une foule de sécrétions microbiennes. A dire vrai, toutes ces sécrétions ne se comportent pas, à cet égard, d'une façon uniforme; il en est qui résistent énergiquement aux élévations thermiques; ce sont de préférence celles que l'alcool dissout, celles qui se rapprochent plutôt des alcaloïdes. Les plus sensibles sont les corps qui rappellent de près ou de loin les diastases;

ils se comportent à la façon de ces composés, dont Morris, Brown, Sullivan, Thomson, Duclaux, Dubourg, Wrobleski, récemment Bertrand, nous ont révélé quelques attributs.

L'activité de ces diastases est sans proportion avec la masse utilisée; l'optimum change d'un élément à un autre, d'autant plus que le nombre de ces matières, diastases, albumines, sucres, glycérides, glucosides, substances amylacées, etc., s'accroît chaque jour; les unes sont hydrolysantes, peptonisantes; les autres coagulantes, oxydantes, etc.

Le point du maximum d'énergie oscille suivant le degré de pureté, le titre de la dilution; les quantités de composés transformés sont sous la dépendance d'une infinité de conditions, comme Miquel l'a mis en évidence pour les uréases; c'est ainsi, par exemple, que la sécheresse ou l'humidité, plus encore le degré thermique, la réaction, etc., interviennent d'une façon manifeste.

Ces oscillations du maximum d'énergie se retrouvent avec des changements, lorsqu'il s'agit du chiffre de la destruction ; la concentration du liquide qui contient le principe, sa nature, sa densité, etc., joue un rôle, fait avancer ou reculer le degré qui marque la désorganisation totale de ce principe. Du reste, quand on traduit en courbes ce qu'on est en droit d'appeler les travaux des diastases, on rend plus saisissables les rôles de tous ces facteurs.

Les substances bactéricides, les matières anti-toxiques, les alexines de Buchner, les extraits leucocytaires de Löwit, de Jacob, de Schattenfroh, etc., ces divers produits, utiles en général à la défense de l'organisme, se révèlent habituellement un peu plus résistants aux différents agents, à la chaleur, par exemple, que les sécrétions bactériennes d'ordre diastasique : aussi Dziergorwsky a-t-il songé à se servir de ces caractères distinctifs pour dissocier toxines et anti-toxines.

La lumière exerce, sur les bactéries, une influence des plus manifestes, mise en évidence par un nombre considérable de travailleurs ; parmi eux, il n'est que juste de citer Arloing, Duclaux, Straus, Roux, Gessler, Raspe, Gotliar, Tyndall, Downes, Blunt, Pansini, Dandrieu, Tizzoni, d'Arsonval, Charrin, Jamieson, Procaccini, Esmarck, Ledoux-Lebard, Krusse, Frankland, Hardy, d'Arcy, Cattini, Marshall-Ward, etc. — Leurs études ont porté sur une foule d'espèces, en particulier sur la bactéridie charbonneuse, sur les bacilles typhique, diphtérique, pyocyanique, sur la virgule cholérique, le pneumocoque, les streptocoques, le germe du côlon, plus récemment sur le virus de l'iléo-typhus que Mosello a soumis à des expériences variées.

Pasteur nous a révélé la dispersion des infiniment petits dans l'atmosphère; à l'époque de ses retentissantes discussions sur la génération spontanée, il a montré à quelles causes d'erreur exposent ces infiniment petits épars de tous les côtés. — Miquel s'est efforcé de dénombrer ces parasites ; il les a vus plus abondants dans les villes, dans les hôpitaux, dans les points où les rayons lumineux pénètrent difficilement ; l'altitude, les vents, la pluie, la température, l'oxygène, les vibrations mécaniques, l'électricité, une foule de conditions fréquemment liées aux oscillations de l'intensité de ces rayons lumineux, etc., font varier cette teneur en microbes.

Downes et Blunt ont des premiers fourni des démonstrations expérimen-

tales irrécusables ; ils ont prouvé que les cultures soumises à l'insolation se développent avec peine. — Duclaux a signalé les rapports de proportion entre cette atténuation et l'intensité de cette insolation ; Arloing aboutit à des conclusions analogues, mais, résultat nouveau, il remarque que les spores du charbon de rate résistent plus longtemps que les agents pathogènes adultes. — Straus a supposé que la lumière agit en réalité sur les filaments qui tendent à se dégager de ces spores, autrement dit sur ces êtres arrivant à cet état adulte ; de fait, si on place ces corps sporulés dans de l'eau stérilisée, non dans du bouillon, si, faute d'aliments, cette évolution ne se réalise point, on n'observe pas le phénomène, du moins avec la même netteté. — Roux a formulé une autre explication fort suggestive ; il a établi que, grâce à cette action de la clarté solaire, les milieux subissent des processus d'oxydation les rendant plus ou moins stériles ; il suffit de chasser l'oxygène, par suite de réaliser l'impossibilité de ces métamorphoses, pour constater que ces spores offrent le maximum de la résistance. En somme, ces radiations du spectre modifient et les éléments vivants et les milieux inertes.

Du reste, nombre de facteurs changent ces effets. — Placez sur le trajet de ces rayons une couche d'eau plus ou moins épaisse ; quelques centimètres suffisent pour que l'influence soit notablement amoindrie ; Wesbrook a enregistré ce fait ; Palermo l'a signalé à propos du vibrion du choléra, qui cependant supporte dans l'Inde les feux des bords du Gange.

En milieu humide, suivant Momont, Pansini, le spectre solaire intervient plus énergiquement que dans l'hypothèse d'une parfaite dessiccation ; Gaillard, Janowski, Ledoux-Lebard ont montré la justesse de cette observation à propos des bactéries de la fièvre typhoïde et de la diphtérie ; ces auteurs ont reconnu que la lumière directe est plus active que les rayons diffus, même les plus réfringents.

On doit à Geisler, à Buchner, à Frankland, plus encore à Marshall-Ward, l'indication précise de la partie de ce spectre qui intervient au maximum ; c'est la partie la plus réfrangible, la partie voisine du violet, la zone chimique ; en interposant des solutions d'alun ou de bichromate de potasse, en plaçant des écrans, des verres colorés, entre la source et les germes, on enregistre des résultats qui sont parfois comme 1 est à 24.

Ces données éclairent une foule d'observations en apparence bizarres ; on comprend pourquoi le nombre des parasites n'est pas uniquement soumis aux attributs de la température ; aussi ne doit-on malheureusement pas trop compter sur les rigueurs de l'hiver pour mettre un terme aux fléaux. — En été, l'élévation thermique devrait faire augmenter le chiffre de ces bacilles ; mais l'intensité de l'éclairage, sa persistance compensent largement ce rôle de l'hyperthermie ; dans la Tamise, dans des lacs, dans celui de Genève plus spécialement, la décantation unie à cet éclairage fait que le maximum de pureté des eaux s'observe vers la fin des mois de juin ou de juillet.

Dans ces derniers temps, on s'est demandé si les rayons de Rœntgen exercent une action ; les expériences à cet égard se sont rapidement multipliées ; il suffit de citer les essais de Courmont et Doyon, sur la diphtérie, ceux de Destot, de Berton, de Bergonié, de Mongour, de Frantzius, de

Blaise, de Balthazard, etc., sur les agents de la bacillose, sur le microbe de Löffler, etc. ; ces essais n'ont fourni que de maigres résultats, sauf peut-être ceux de Lortet et de Genoud ; ces auteurs ont, en effet, atténué, guéri même, dans un cas, la tuberculose du cobaye ! Est-il nécessaire de faire remarquer avec quelle urgence ces travaux réclament des vérifications !

Il ne semble pas cependant que la source ou plutôt que la nature de la source lumineuse ait une bien grande influence ; j'ai réussi, avec le professeur d'Arsonval, à détériorer profondément l'activité du bacille pyocyanique en employant des ondes issues d'un arc électrique.

Cette influence de la lumière, qui porte avec prédilection sur l'assimilation comme sur la fructification, d'après Elfving, est donc incontestable ; elle n'est, d'ailleurs, nullement limitée, on le sait depuis longtemps, à ces bactéries ; les végétaux plus ou moins élevés, les tissus animaux n'échappent pas à cette action.

Linné, de Candolle, d'autres venus après, ont signalé l'héliotropisme, les mouvements des tiges, des rameaux, des feuilles. — Fianitzin, Borodine, etc., ont mesuré la vitesse de déplacement des granulations protoplasmiques plus ou moins bien éclairées ; l'obscurité ralentit ces mouvements ; le froid agit dans le même sens, si on s'en rapporte à Schultze, à Nœgeli. Or, le défaut de tout rayon lumineux, de tout degré thermique, rend la nutrition torpide, paresseuse. Il me semble que ces mensurations font tomber sous le sens ce ralentissement des pathologistes ; elles le réduisent à ses éléments essentiels, primordiaux, attendu que les échanges, pour une part, consistent dans ces translations au sein de la cellule. Du reste, observateurs et expérimentateurs accusent en partie les mêmes causes.

Là où le soleil ne pénètre pas, la plante pâlit, s'étiole ; là également l'animal s'anémie, se développe mal. — J'ai vu un couple de lapins, un mâle et une femelle, vivant au fond d'une cave aussi noire qu'humide, donner naissance à six rejetons présentant de nombreuses irrégularités osseuses, de l'entérite, une taille exiguë : au bout d'un mois, les six étaient morts.

Bizzozero a observé des déformations globulaires rapides déterminées par un éclairage intense ; Auerbach a constaté des augmentations de volume sur des œufs de grenouilles ou sur des larves impressionnés par des rayons solaires ; Engelmann a signalé des mouvements rétiniens, Verwez, avec lui Lœb, des contractions musculaires, lorsqu'on dirige sur ces éléments ces rayons lumineux ; en éclairant des zones successives d'un même récipient, on amène des daphnies à se grouper dans ces différents points, attirées en quelque sorte par cette clarté ; on peut, pour ainsi dire, les prendre au piège.

Piacentini, Moleschott, Chassanowitz, Fubini, Benedicenti, etc., ont reconnu la suractivité de l'assimilation chez des animaux subissant l'influence de la lumière ; Scharling a trouvé 1 de carbone pendant la nuit et 1,327 pendant le jour ; Palladine a vu l'exposition aux radiations bleues déterminer, dans les feuilles, une absorption plus prononcée de sucre, un accroissement de l'acide carbonique exhalé ; par contre, sous ces radiations bleues, le ver à soie fabrique, à en croire Flammarion, son minimum de soie, tandis qu'il fournit son maximum sous des verres incolores.

Peut-être la pathologie de minuit dépend-elle, pour une part, de cette action ? Le goutteux est atteint de paresse nutritive, ses acides ne sont pas conduits assez promptement à l'état d'eau ou de CO^2 ; quand à cette paresse propre s'ajoute le retard des heures obscures, l'accès de goutte aiguë éclate. — Des processus qui relèvent partiellement des auto-intoxications, les crises d'asthme ou d'épilepsie, aboutissent aussi à des manifestations douloureuses, paroxystiques, lorsque les poisons accumulés atteignent un niveau déterminé ; or, la torpidité des échanges, en poussant moins loin les oxydations, facilite l'accumulation de ces poisons internes.

Finsen a tenté de traiter quelques éruptions par des rayons rouges ; bien qu'à cet égard il eût mieux valu s'adresser aux violets, on a cependant, pour la variole et le lupus, obtenu quelques résultats. En tout cas, l'histoire du coup de soleil prouve clairement que la zone chimique du spectre exerce une action sur la peau : ce n'est point, en effet, la partie calorifique qui intervient.

Le système nerveux subit de son côté cette puissance de la lumière. — Voltaire, Balzac travaillaient le jour ou la nuit ; mais, dans cette dernière hypothèse, ils s'entouraient d'une infinité de sources lumineuses artificielles ; Wagner ne composait que dans des pièces tendues avec des étoffes vertes ; il est, du reste, de connaissance vulgaire qu'un ciel sombre prédispose à la tristesse ; voilà pourquoi, avec Ponza, quelques aliénistes ont essayé de recourir à certains rayons ou au spectre entier pour modifier les maladies psychiques.

Ajoutons que de plus en plus les médecins livrent aux personnes en traitement air et clarté ; on conçoit l'utilité de ces pratiques, quand on voit la lumière agir sur l'économie, sur nos cellules, sur notre nutrition, quand on enregistre ses attributs à l'égard des germes, des parasites. On comprend mieux encore si on songe que cet agent modifie les corps inertes, change la toxicité des urines, celles d'une solution d'acide oxalique ou de divers composés, parmi eux les sécrétions bactériennes. C'est qu'en effet, en dehors des accroissements de principes phosphorés, sulfureux, etc., dosés chez les plantes par Berthelot, on arrive à constater que cette lumière actionne la vitalité de nos éléments anatomiques normaux en voie de formation, suivant Sacerdotti, ou de réparation ; on voit qu'elle détériore la virulence des parasites ou l'énergie d'une série de poisons, parmi eux les substances microbiennes ou antitoxiques, d'après Abba ; autrement dit, on est amené à reconnaître que cet agent atmosphérique est capable de modifier les divers éléments qui entrent en jeu dans le mécanisme des troubles morbides ; c'est peut-être ce qui explique comment Vogt et Rafz ont établi que si les deux côtés d'une rue sont inégalement ensoleillés, c'est le plus obscur qui paye à la mortalité le plus lourd tribut.

La lumière, la chaleur, le froid agissent par leurs propres attributs ; mais leur action directe n'est pas la seule ; ces agents interviennent aussi indirectement ; ils modifient en particulier l'état hygrométrique de l'atmosphère ; par là ils influencent encore la manière d'être des infiniment petits.

Assurément la dessiccation, plus encore que l'humidité, produit sur la vitalité des infiniment petits, comme sur celle des organismes élevés, comme sur

notre propre circulation, à s'en rapporter à Levacheff, d'indéniables effets; pourtant on rencontre certaines espèces encore actives dans des milieux ou sur des points dépourvus d'humidité.

C'est ainsi que Babès, Eiselsberg, Emmerich ont décelé des streptocoques sur des murs de casernes, quelquefois à la surface du sol; Uffelmann, Pavlowsky ont isolé ces mêmes agents dans des caves; Tryde, Salomonsen dans la poussière d'une cour. — Netter a signalé le pneumocoque dans les débris de toute sorte que met en mouvement le balayage des salles d'hôpital; dans ces conditions, Ullmann a isolé divers staphylocoques; Cornet a reconnu le bacille de la tuberculose; Kustmann a, dans l'air des prisons, dépisté ce bacille de Koch, etc.

Il est facile de concevoir à quel point le nombre, les qualités de ces parasites sont influencés par les saisons, la température, la lumière, la ventilation, la pluie, l'oxygène, etc. ; l'altitude, le voisinage des villes, des lieux habités, certaines agglomérations modifient également ce nombre comme ces qualités : il suffit de consulter les travaux de Hesse, de Petri, de Frankland, de Tyndall, de Stern, plus encore ceux de Pasteur ou surtout de Miquel, pour se convaincre de la variété de ces influences : l'air des égouts, celui des hôpitaux, quand il s'agit des espèces pathogènes, offrent une flore particulièrement intéressante. Pourtant ces bactéries ne dérivent pas de l'expiration qui, sauf exception, d'après Gunning, Wurtz et Straus, Grancher, Charrin, etc., ne rejette aucun infiniment petit; elles proviennent, en partie, pour celles qui sont spéciales, des humeurs répandues, puis rendues pulvérulentes; toutefois, cette expiration, dans des conditions de brusquerie, de soudaineté, d'éternuement, renferme, suivant Flugge, quelques microbes.

La résistance à la sécheresse permet à ces microbes de vivre à la surface d'une foule de produits ou d'objets. — Schneider a découvert le germe de la bacillose sur des grains de raisin; Gasperini, Roth, sur du beurre; Werinkel a vu certains agents vivre sur des plantes, en particulier sur du tabac; Trouskolaski sur des feuilles d'observation médicale; du Cazal, Catrin, ont étudié avec soin le mode de transmission des virus par les livres; les lettres paraissent avoir quelquefois propagé la scarlatine; Abel a accusé des jouets d'enfant comme éléments de transport pour le virus diphtérique; au point de vue de la faculté de supporter la dessiccation, on estime que le maximum appartient habituellement aux bacilles inclus dans les fausses membranes. — Okada, Solovieff, Zeleneff, etc., ont examiné la richesse en parasites des murs d'un vestiaire, des parois des meubles. A dire vrai, d'après Wesbrook, Palermo, aussi bien que d'après Koch, la résistance de ces parasites desséchés oscille avec l'épaisseur des couches étalées, avec l'éclairage, la nature des germes, etc.; quelques-uns possèdent, à en croire Hueppe, des arthropores douées d'une grande résistance à la sécheresse; cette sécheresse elle-même, suivant Sitsen, nuit à l'action antiseptique des désinfectants.

Berkholtz a mesuré la survie en se servant de l'exsiccateur sulfurique; Kitasato a indiqué le rôle bienfaisant de l'eau dont on imbibe les fils de soie chargés de culture; Dunham estime à 6 ou 8 jours la persistance du vibrion cholérique déposé sur une toile humide, tandis que ce vibrion périt en

quarante-huit heures, lorsque cette toile est sèche; Giaxa, en opérant avec du sable, aboutit à des conclusions analogues; Ottolenghi constate que le pneumocoque placé sur un linge sec en pleine lumière n'est pas détruit au bout de huit semaines.

Dès lors, on conçoit que la contagion par l'air, en dépit des difficultés, des causes d'atténuation, puisse à la rigueur s'exercer, comme le soutiennent plusieurs auteurs, en particulier Hesse, Sicard, Billings, Pekham, plus récemment Eduardo Germano, à propos de la diffusion de la fièvre typhoïde, Bertrand pour la dysenterie, Flugge pour la bacillose, etc.

Dans l'eau, les infiniment petits vivent sans manifester une grande activité de fonctionnement, de pullulation; ils échappent plus aisément que dans l'atmosphère aux causes d'affaiblissement. Néanmoins, là encore, ils subissent dans des proportions variables l'action des agents aériens, du manque relatif d'aliments, de la concurrence vitale, des changements imposés par les pluies, les saisons, etc.; or, ces changements condamnent ces êtres vivants, suivant Haffkine, à de nouvelles accoutumances, à des nécessités, pour ainsi dire, de s'acclimater de temps à autre à ces modifications de composition; une série de parasites supportent mal ces oscillations, principalement quand la teneur en matières minérales est bouleversée.

Les recherches de Schmelck, de Prudden, de Bujwidd, de Bordoni-Uffreduzzi, de Percy-Frankland, de Fraenkel, d'Heræus, de Schlatter, de Karlinski, de Fol et Dunant, de Breunig, de Fazio, de Gaffky, de Malde-Bolton, de Hoschstetter, de Wolhflugel, de Gärtner, etc., ont mis en évidence le nombre, la variété, les conditions d'existence de ces bactéries, depuis celles de la glace, de la neige, de la grêle, des pluies, des rivières, des réservoirs, jusqu'à celles des sources, sources ordinaires ou thermales minéralisées, sources sulfureuses, ferrugineuses, etc.; la pureté absolue de ces liquides est chose exceptionnelle; il faut une chaleur élevée ou une épaisseur considérable de terrain, une réserve protégée par un périmètre étendu, opérant une filtration dans d'excellentes conditions d'épuration. — L'intervention des agents atmosphériques, les oxydations, les suroxydations, qui sont plus énergiques quand le bouillonnement est considérable, réduisent les microorganismes des fleuves.

Les effets attribuables à l'état hygrométrique, l'influence de la sécheresse comme celle de l'humidité, se retrouvent plus nettement, lorsque l'attention, quittant les germes de l'eau, se porte sur ceux du sol. — Là encore, évidemment, on doit tenir compte de la qualité des terres, des aliments qu'elles renferment, de leur température, de leur exposition aux rayons lumineux, des conditions de la culture, etc. Par exemple, la matière organique la plus voisine de son état primitif, la plus colloïdale, existe de préférence dans les couches superficielles; aussi, est-ce dans ces couches qu'on décèle les microbes chargés de détruire, de transformer cette matière; ce sont les plus exigeants en fait de principes nutritifs; ils réclament des peptones, de la gélatine, du sucre, etc.

A mesure qu'on s'éloigne de la surface, on découvre des êtres demandant une alimentation moins complexe; parmi eux prennent place les agents nitrificateurs des sels ammoniacaux, qui agissent sur des matériaux moins

absorbables que les substances colloïdes, pénétrant par suite plus avant.

Supposons les abscisses horizontales proportionnelles à la quantité des infiniment petits contenus dans 1 centimètre cube de terre à diverses hauteurs; supposons une ligne des ordonnées permettant par sa direction de repérer les profondeurs; il est aisé, dans ces conditions, de construire la courbe du premier groupe comme aussi celle du second.

Il est évident que des irrégularités peuvent se produire sous l'action des oscillations portant sur la capillarité, la pénétration des fluides, le nombre ou les dimensions des lacunes, la clarté solaire, le froid, la chaleur, les pluies d'entraînement, l'état hygrométrique extérieur, etc., etc.

Quoi qu'il en soit, l'expérience établit, avec Schottelius, Nicolaïer, de Giaxa, Bombicci, San Felice, etc., que des agents pathogènes, par exemple ceux du tétanos, du choléra, de la peste, de la tuberculose, tout en subissant l'action de la sécheresse ou de l'humidité, conservent dans ce sol une partie plus ou moins apparente de leur virulence; en dehors des microbes usuels, un grand nombre d'anaérobies se rencontrent dans cette épaisseur; on les décèle de préférence en s'éloignant des couches les plus exposées à la lumière.

Nul n'ignore le rôle considérable qu'on a fait jouer aux fluctuations de la nappe souterraine, partant aux changements survenus dans les conditions propres à maintenir sèches ou humides les diverses couches de la terre : pour Pettenkofer et l'École de Munich, l'abaissement de cette nappe entraîne l'éclosion d'une série de maladies, en premier lieu de la fièvre typhoïde. Peut-être en se retirant, surtout si elle laisse un certain degré d'humidité dont le plus favorable est 2 p. 100, d'après Fodor, permet-elle aux bactéries de retrouver des aliments moins dilués, d'évoluer dans un meilleur milieu, etc — Si on apprécie cette doctrine par les résultats, par l'assainissement qui suit la désinfection de ces couches terrestres, on est porté à penser qu'elle contient une part d'exactitude. Toutefois, les faits plaident non moins éloquemment en faveur de la théorie de Koch, de l'École de Berlin, du [Trinkwasser] opposé au Grundwasser : la vérité, sans doute, est ici, comme ailleurs, dans une juste mesure.

Il est à peine besoin d'ajouter que si des microbes vivent dans le sol, ils périssent aussi, même si on maintient les proportions d'eau les plus favorables, la végétation concourt à faciliter cette destruction, comme le prouve l'histoire des champs d'épandage.

Qu'ils soient dans le sol, dans l'air ou dans l'eau, les germes subissent donc l'influence de l'état hygrométrique, l'action de la sécheresse ou de l'humidité; dans nombre de circonstances, une dessiccation prolongée les affaiblit, puis les détruit : de là l'inconvénient des arrosages insuffisants, inconvénient relevé par Moshima. Pourtant, sous l'un ou l'autre de ces états, sec ou humide, si on se préoccupe de la réaction alcaline, acide ou neutre, on reconnaît que les ferments recherchent la première, tandis que les moisissures préfèrent la seconde; la troisième est en général assez favorable. Aussi, quand dans ces conditions de réaction favorable on conserve des parasites à l'abri de l'air, de la lumière, dans des milieux humides, on les retrouve encore vivaces dix, quinze, vingt-cinq ans après.

La clarté, l'aération, jouent, en effet, un rôle marqué, bien mis en évidence par Vaillard et Vincent au cours de leurs études sur le bacille du tétanos ; les spores de ce bacille demeurent fixées sur des fils durant des mois sans périr, pourvu qu'on les place dans l'obscurité, loin des oscillations de l'atmosphère.

C'est en raison de ces nombreuses influences capables de modifier les résultats, qu'il est difficile de formuler des lois générales relativement au pouvoir de l'état hygrométrique sur la vitalité des êtres vivants. Pour chacun de ces êtres, il serait indispensable d'entreprendre des travaux semblables à ceux que Momont, Alessi, Sirena, Marpmann, Walliczek, Guyon, Dempster, Diatroptow, etc., ont poursuivi sur la résistance que présentent, suivant la sécheresse ou l'humidité, les agents du choléra, de la tuberculose, du charbon bactéridien, de la dothiénentérie, etc.

Parmi ces microbes, il en est, comme celui de la peste, qui, d'après Kitasato, périssent promptement lorsqu'on les dessèche ; d'autres, au contraire, supportent énergiquement cette dessiccation. Il faut donc compter avec les espèces ; il faut également se préoccuper du degré de vitalité de chaque élément soumis à l'examen.

Du reste, le sec ou l'humide ne changent pas brutalement la manière d'être des infiniment petits ; la dégradation s'opère peu à peu, frappant d'abord les sécrétions, puis la pullulation, enfin la nutrition, la vie elle-même. C'est sur cette progression dans l'atténuation des virulences qu'est en partie basée la vaccination antirabique. — Suspendues dans des flacons stérilisés, fermés avec un tampon d'ouate, les moelles des lapins morts de la rage se dessèchent régulièrement dans des milieux purgés de vapeurs d'eau ou d'acide carbonique par les absorbants usuels ; leur activité décroît rapidement, au point de s'annuler vers le quatorzième jour. Aussi commence-t-on ces inoculations en injectant des émulsions de ces tissus spinaux impuissants, après ces quatorze jours, à faire naître des accidents ; on se rapproche, de vingt-quatre heures en vingt-quatre heures, en passant par les organes de puissance moyenne, de ceux qui, recueillis depuis une ou deux journées, communiquent fatalement la maladie, quand on commence par eux cette série d'inoculations.

Cette action nuisible de la sécheresse s'étend à une foule d'éléments ; fréquemment on est obligé de mouiller un filet nerveux pour lui conserver ou lui rendre son irritabilité ; il en est de même des épithéliums, de leurs cils vibratiles, des cellules contractiles, à mouvements amiboïdes : il y a longtemps que Cl. Bernard a remarqué que nos tissus ne vivent aisément qu'au sein de plasmas aqueux.

A certains égards, cependant, l'humidité peut se révéler nuisible ; elle s'oppose à une parfaite évaporation, à l'élimination complète de quelques produits qui s'échappent par la peau ; elle met obstacle à la régulation thermique, à la dépuration ; par suite, elle fait fléchir l'état bactéricide, prédispose aux maladies : l'observation clinique le prouve.

Les accidents attribuables à la foudre ont depuis longtemps frappé les imaginations en révélant le pouvoir de l'électricité atmosphérique à l'égard

des êtres vivants. Ce pouvoir, en dehors des lésions cutanées, se traduit par des modalités parfois singulières, relevant le plus ordinairement du système nerveux.

Ce fluide est, en effet, propre à réveiller l'excitabilité, l'irritabilité, la contractilité ; il est apte à activer la nutrition, le fonctionnement des viscères, les sécrétions des glandes, même privées de circulation, d'après Mislawsky ; il peut, suivant Lœb, Tollmer, accélérer les échanges, les fermentations, etc.

Le contact n'est pas toujours nécessaire ; l'action se fait parfois sentir à une notable distance, comme l'établissent les recherches de Danilewsky sur les mouvements neuro-musculaires. Du reste, pour les ondes magnétiques, à s'en rapporter à d'Arsonval, les phénomènes se passent de semblable façon : une grenouille introduite dans un champ puissant offre des perturbations circulatoires manifestes. D'autre part, les applications médicales qui, en dehors du charlatanisme, deviennent chaque jour plus nombreuses, se font quelquefois sans qu'il y ait continuité directe, aussi bien pour l'électricité que pour le magnétisme.

Les organismes cellulaires subissent de pareilles influences ; Galeoti a constaté, après leur mise en jeu, une série d'anomalies dans la karyokinèse, en particulier la fusion trop hâtive des éléments chromatiques.

Cohn, Benno, Mendelsohn, etc., ont examiné les conséquences de l'intervention des courants galvaniques chez les infiniment petits ; avec deux éléments de la pile Marié-Davy, ils n'ont rien obtenu ; avec cinq, avec huit, ils ont enregistré des modifications, surtout au pôle positif. Or, c'est à ce pôle que se rendent les acides, alors que les bases s'accumulent au négatif ; dès lors, tout se réduit à une action chimique. — Il n'en est pas autrement dans les essais de Prochownick et Spœth, qui ont décelé du chlore, toujours à ce pôle +, d'un courant de 60 000 ampères tuant des staphylocoques au bout de quinze minutes. — Apostoli et Laquerrière accusent l'oxygène dégagé, sans tenir compte, du moins au début, de l'élévation thermique, que Kruger, le premier, sut éviter.

D'Arsonval et Charrin ont placé une culture du bacille pyocyanique dans un solénoïde parcouru par un courant de très haute fréquence, fournissant 800 000 oscillations à la seconde ; les modifications à peine sensibles sont réduites à un léger affaiblissement dans la teinte des pigments. — En utilisant ces procédés d'induction, Spiller et Gottstein auraient détruit totalement des microbes, résultat bien plus énergique que celui qui précède ou que celui de Pridenthal ; cet auteur, en effet, n'a produit aucun changement appréciable, en usant de 15 à 20 ampères passant dans une spirale de 10 tours enroulée autour d'un tube de verre de 15 millimètres de diamètre.

En résumé, il y a des contradictions ; quand ces résultats sont considérables, on est amené à se demander si on a suffisamment évité les causes d'erreur d'ordre physique ou chimique, la chaleur, les antiseptiques formés par le dégagement de quelques corps, etc. : il ne semble pas, en tout cas, que la puissance de ce fluide agissant par lui-même soit bien marquée.

Dans les essais de Smirnow, en particulier, les atténuations imposées aux toxines dérivent de l'électrolyse ; cette électrolyse livre, en effet, des hypo-

chlorites issus des chlorures qui existent dans les milieux où prennent naissance ces toxines. Cet auteur n'en a pas moins songé, en agissant ainsi, à fabriquer des principes de défense, de protection, des substances bactéricides ou antitoxiques ; pourtant, la genèse de ces produits paraît réclamer l'intervention de l'animal, le passage dans ses tissus !

D'Arsonval et Charrin ont pu affaiblir l'activité de quelques sécrétions bactériennes en employant des courants oscillants venant d'un condensateur actionné périodiquement par un transformateur à basse fréquence ; le renversement atteignait 200 000 à la seconde. — Entre les mains de Marmier, ce dispositif n'a produit aucun effet ; l'électricité n'a paru agir que dans le cas où l'électrolyse entre en jeu ; cependant, le renversement s'opérait 400 000 fois. En revanche, grâce à cette méthode, Phisalix a modifié les venins ; Bonome, Viola, Casciani, opérant suivant ce procédé de d'Arsonval et Charrin, au lieu d'enregistrer, à la façon de ces auteurs, des tares inconstantes des plus faibles, ont noté des métamorphoses considérables de la toxine du streptocoque : ils ont ainsi confirmé et au delà les données avancées.

Peut-être ces désaccords, à supposer que les causes d'erreur, surtout l'échauffement, aient été soigneusement évitées, dépendent-ils de l'origine de ces toxines qui n'ont rien de défini, qui oscillent d'une culture à l'autre, avec le milieu où se développe le ferment générateur, avec l'âge, les conditions de conservation, etc.

Quoi qu'il en soit, si l'influence de ces courants de haute fréquence appliqués aux sécrétions microbiennes ou à leurs générateurs paraît douteuse, il n'en est point ainsi lorsqu'on opère sur l'économie animale. Sans que la sensibilité soit intéressée, on voit fléchir la pression, pendant que les glandes de la peau ou des muqueuses fonctionnent plus activement.

Aussi de tels agents, du moment où la douleur, capable par voie réflexe de troubler les phénomènes, n'intervient plus, doivent-ils être utilisés, évidemment avec prudence, dans une série de tentatives thérapeutiques. Avec d'Arsonval, auteur qui partage avec Tesla la gloire d'avoir fait connaître ces courants, j'ai enregistré, à la suite de leur emploi, la diminution du sucre, l'amélioration de deux diabétiques ; par contre, chez un cardiaque obèse, les conséquences ont paru médiocres.

L'électricité d'origine extérieure agit donc sur les cellules à des degrés divers ; mais ces cellules sont en outre soumises à des courants qui naissent dans l'intimité des viscères : le fait est connu depuis la célèbre expérience du balcon de Florence faite par Galvani. — Volta attribuait la contraction, c'est-à-dire la production du courant, à la mise en rapport des deux métaux, le laiton du crochet suspenseur de la grenouille et le fer du balcon ; Galvani répondit en obtenant ces contractions simplement par le contact des tissus, nerf et muscle, par la juxtaposition des tranches musculaires seules. Volta de son côté imagina alors son admirable pile : l'un et l'autre avaient raison.

Ces courants n'existent pas uniquement dans l'appareil neuro-musculaire ; ils ne se rencontrent pas uniquement à la surface du muscle qui est positive ou dans son épaisseur qui est négative, à la périphérie du tronc nerveux

ou suivant son axe; on les retrouve encore dans les glandes, dans la peau, dans celle de la grenouille, d'après Cl. Bernard, dont les deux faces ont chacune une électricité particulière; elles semblent constituer les deux feuillets d'un condensateur, d'une bouteille de Leyde. D'autre part, d'après Waller, à chaque révolution cardiaque le galvanomètre décèle des oscillations marquées dans le passage de l'électricité, oscillations qui se répètent à l'instant où l'inspiration succède à l'expiration.

Il n'est pas jusqu'aux simples mouvements des noyaux, jusqu'à la karyokinèse, qui ne provoquent des manifestations de cet ordre, peut-être par une sorte de réciprocité, puisque, d'après Galeotti, cette électricité exerce une indéniable action sur l'orientation de ces changements karyokinétiques.

Dans ces conditions, on comprend à quel point ces courants peuvent changer l'état dynamique d'un organe; ces changements, qui parfois n'intéressent qu'une zone limitée du viscère, sont proportionnels à la faiblesse ou à l'intensité de ces courants.

On a de la peine, en présence de ces faits, à ne pas invoquer l'expérience de Lippmann. — Cet auteur place un globule de mercure dans le récipient de son électromètre; chaque fois que le circuit est fermé, ce globule se contracte, devient sensiblement sphérique; puis, dès qu'on rompt ce circuit, la forme subit des transformations; le métal semble pour ainsi dire s'affaisser. Or, à ce polymorphisme correspondent des processus d'oxydation et de réduction successifs : tout commentaire affaiblirait ce qu'il y a de suggestif dans cette constatation !

Il n'est pas impossible que l'ozone intervienne dans la genèse des modifications que l'électricité impose aux bactéries. — Les premières études, celles de Christmas, en particulier, ont, il est vrai, conduit à considérer ce corps comme faiblement bactéricide; toutefois, dans ces dernières années, on a imaginé des appareils qui permettent d'épurer les eaux en utilisant ce gaz. — Ces eaux, plus ou moins grossièrement filtrées, arrivent dans des ozoniseurs où passe un courant de haute tension, atteignant 50 000 volts; soumises à ces agents, elles perdent leur odeur, s'éclaircissent, se dépouillent de leurs germes.

En examinant le procédé du baron Tindal, perfectionné par Abram et Marmier qui ont appliqué cette méthode à la stérilisation des eaux de Lille, Van Ermenghen a constaté qu'en dix minutes on voit disparaître jusqu'à 7 800 000 infiniment petits par centimètre cube; dans l'espèce, il s'agissait du bacille du côlon.

L'azote n'a pas la puissance de cet ozone qu'on doit tendre à employer au maximum de concentration; on connaît le pouvoir de l'oxygène, mais non celui des gaz récemment découverts dans l'air.

Nul n'ignore les liens, les analogies qui rapprochent entre elles les vibrations de divers ordres; on tend même à les utiliser en thérapeutique. Aussi, la mise en évidence de l'action de ces vibrations, ou, si on préfère, des ondes, des radiations thermiques, lumineuses, électriques, sur le développement des êtres vivants, conduit à rechercher ce que peuvent faire à cet égard celles qui sont considérées comme étant plus exclusivement de nature phy-

sique; telles sont celles qui dérivent des différents mouvements; telle est encore la pesanteur.

Horvath prétend que l'agitation exerce sur les parasites inférieurs une indiscutable influence; Buchner, qui a expérimenté sur le bacille subtil, n'a rien obtenu; en revanche, Tumas, Roser estiment que si, dans ces conditions, des modifications se produisent, elles sont plutôt favorables à l'évolution de ces parasites.

Poehl, Bang ont soumis des microorganismes à la force centrifuge; ils ont vu que cette force, après une assez courte mise en jeu, provoque une sensible diminution de nombre. Toutefois, Scheurlen a prouvé que cette diminution est plutôt apparente; il suffit de mélanger avec soin les couches profondes ou superficielles, de détacher ce qui adhère aux parois des récipients, pour ne pas constater d'abaissement manifeste.

On sait, en effet, grâce aux expériences de Haffkine ou aux observations de Certes, que l'agitation d'une masse liquide multiplie, en les reproduisant plus fréquemment, des contacts assez souvent suivis d'adhésion entre les germes en suspension et les surfaces internes des vases. Aussi Gärtner tient-il compte de la forme de ces vases, de leur mode de fermeture, du procédé utilisé pour déplacer les molécules, etc. Cette diversité dans les conditions explique, pour une part, les contradictions formulées, d'un côté, par Cramer estimant que le repos hâte la pullulation des microbes, d'un autre côté, par Leone qui soutient que ce repos est indifférent.

Ajoutons que Ricome a signalé l'action de la pesanteur sur des cultures, action se traduisant par des dispositions spéciales, par des distributions qui seraient soumises en partie aux actions électriques ou magnétiques !

Qui ne conçoit, à propos de ces influences d'ordre physique, la facilité des dissemblances dans les conclusions, quand on voit intervenir tant de facteurs propres à faire varier les résultats ! Un excellent appareil à force centrifuge permettrait sans doute de pousser plus avant le problème; son utilité ne se bornerait pas à l'étude de cette question.

Actuellement, en effet, pour dissocier bactéries et toxines, on fait usage des filtres ou bien on détruit ces bactéries par la chaleur; or, dans l'un et l'autre cas, on détériore ces toxines. On comprend, en revanche, que si on parvenait à rejeter tous les êtres vivants à la périphérie du liquide soumis à cette opération, on recueillerait des poisons microbiens sans altération notable. Malheureusement, les différences de poids entre deux molécules, l'une bactérienne, l'autre aqueuse, sont tellement minimes qu'une quantité assez considérable de ces infiniment petits ne se trouve pas en quelque sorte refoulée. Peut-être, en employant des axes flexibles, analogues à ceux de la turbine Laval, parviendrait-on à obtenir 40 à 50 000 tours? Dans cette condition, les centres des divers axes se superposent; il n'y a plus de tendance pour les atomes à se séparer, à se disjoindre, en obéissant à cette force de dislocation qui se montre ici, tout au moins pour une part, proportionnelle à la rapidité, au nombre de ces tours. Mais, par contre, lorsqu'on arrive à de pareilles vitesses, on est en droit de se demander si la cohésion des particules solides

est capable de résister à de tels ébranlements : l'avenir fournira la réponse, en livrant aux laboratoires ce perfectionnement technique.

Il n'est pas nécessaire d'atteindre, il s'en faut de beaucoup, une semblable énergie pour modifier par cette force centrifuge le fonctionnement des organismes relativement élevés ; sous une telle action, des désordres nerveux, circulatoires, sensoriels, se manifestent ; des vertiges, des vomissements traduisent pour ainsi dire extérieurement les modifications survenues dans l'économie ; suivant la position de la tête par rapport à l'axe, Marcacci a vu les vaisseaux veineux se vider, le cœur s'arrêter ou se ralentir ; le passage à la station verticale accroît, d'après Sciamana, l'amplitude du pouls ; on sait le rôle du repos en thérapeutique ; « le repos, disait Bonnet, est le meilleur des antiphlogistiques » ; même chez les aliénés agités, suivant Toulouse et Marchand, le séjour au lit réussit quelque peu. Il est plus aisé, quand on fait agir ces agents de mouvement, d'agitation, de provoquer des changements dans les tissus, dans les cellules animales, que dans les éléments bactériens.

Il en est de même si on étudie l'influence de la pression atmosphérique. Nul n'ignore, en effet, les malaises, les sensations d'inaptitude au travail physique ou psychique, lorsque cette pression oscille de quelques millimètres. En retour, il convient de mettre en jeu des centaines, des milliers d'atmosphères, si on désire atténuer l'activité de quelques cellules ; plus d'une fois le résultat est nul.

P. Bert cependant a refréné le fonctionnement de la levure ; P. Regnard a constaté que la putréfaction se ralentit, puis cesse de se poursuivre aux environs de 750 ; à 300, à 400, elle n'offre, d'après Certes, aucune anomalie. D'ailleurs, d'Arsonval et Charrin ont pu réaliser des modifications plus accentuées sous l'acide carbonique à 40 que sous l'air pur à 50 ; ces expériences établissent clairement que la pression intervient en favorisant l'action des antiseptiques gazeux, mais non par elle-même.

Klebs a prétendu qu'au-dessous de 800, lorsque le baromètre marque 720, le vibrion cholérique ne se développe pas ; cette opinion exige impérieusement des vérifications. Pourtant, suivant Bœhm, la segmentation des œufs varie avec le nombre des atmosphères ; pourtant aussi la compression exercée sur le poumon tuberculeux par un épanchement pleural semble avoir une heureuse influence, mise en évidence expérimentalement par P. Teissier. Autrement dit, les éléments anatomiques de l'organisme subissent avec plus de sensibilité l'action de la pression ; on connaît les travaux de Viault, de Malassez, de Friedrich, de Tanski, etc., sur le rôle des altitudes dans la genèse des hématies, de leur hémoglobine, dans les augmentations de volume de ces globules rouges, etc. ; on sait également que la vie dans l'air comprimé permet de pousser plus avant les oxydations, d'obtenir des urines moins toxiques.

Dans ces processus, l'oxygène à coup sûr intervient ; il peut agir de plusieurs façons ; parfois il modifie les bactéries au point de permettre à Chauveau de confectionner des vaccins ; il fait obstacle à leur développement. — Une telle constatation met en lumière le groupe des microbes anaérobies, étudiés par Prazmowski, Nencki, Nœgeli, Rosenbach, etc. Or, parmi ces germes, il

en est qui sont exclusivement capables de vivre au contact de l'oxygène, tandis que d'autres ne supportent pas ce principe; une troisième catégorie comprend des éléments mixtes.

Le fonctionnement de ces êtres varie beaucoup suivant les conditions de présence ou d'absence de ce gaz : Pasteur l'a établi en cultivant la levure de bière. — Si cette levure est submergée, si elle n'a pas d'oxygène à sa disposition, quand on la place dans un liquide sucré, elle attaque le glycose pour lui emprunter ce corps qu'elle prend dans l'air, dans le cas où elle végète à la surface. — Comme il est aisé d'entrevoir les conséquences d'un pareil mode de nutrition! il y a là, pour la vie cellulaire, des variations profondes, d'autant plus importantes que nos propres tissus, pour une part, vivent à la manière de ces parasites qui ne pullulent pas volontiers dans les milieux oxygénés; les réductions, les dédoublements ne constituent pas des opérations bien rares dans la profondeur des viscères. D'ailleurs, si les êtres vivants réclament de l'oxygène, il importe en général qu'il ne soit ni trop abondant, ni trop pur, car il peut agir alors à la façon d'un toxique.

La pression atmosphérique, comme l'oxygène, devient nuisible quand elle s'accroît dans certaines proportions; son influence se montre néfaste pour les éléments cellulaires, lorsque cette pression fléchit au delà des limites naturelles : il suffit, pour le démontrer, de rappeler la catastrophe de Sivel et Crocé-Spinelli, les accidents des décompressions trop brusques, etc.; les hémorragies, la perte de réactions nerveuses, l'asphyxie, etc., sont au nombre des conséquences directes et de ces décompressions et du défaut d'une substance capable d'entretenir la respiration.

Ainsi, les cellules, les cellules bactériennes plus encore que celles de l'organisme animal, obéissent à une série d'influences; d'autre part, chaque élément, origine de ces influences, subit lui-même de nombreuses variations; d'un instant à l'autre, température, lumière, état hygrométrique ou électrique, pression, ozone, oxygène, etc., tout peut changer! En présence de telles oscillations, n'est-on pas en droit de leur attribuer partiellement le polymorphisme des maladies? Toutes ces actions réunies ne répondent-elles pas à l'ancienne notion du génie épidémique? Ne sont-elles pas, comme ce génie, mobiles et variables au point de vue de la gravité, de la durée, etc., des lésions?

Tantôt les modifications réalisées amènent la cellule à fonctionner d'une façon anormale; alors éclate une affection du rein, du poumon, etc., suivant que cette anomalie fonctionnelle porte sur tel ou tel organe. Tantôt les changements aboutissent à un résultat de même ordre, à un trouble des appareils faisant passer l'économie de l'état physiologique à l'état pathologique; mais, en outre, sur ce milieu ainsi modifié vient se greffer un microbe; l'infection, dès lors, se développe à titre de conséquence plus ou moins directe.

ACTIONS HYGROMÉTRIQUES SUR LES VÉGÉTAUX

Par M. MANGIN

Le corps des végétaux est formé de substances solides toujours associées à une certaine proportion d'eau, qui, suivant la nature, l'âge ou l'état de vie de la plante, oscille entre 5 et 95 p. 100.

Sauf les plantes aquatiques, chez lesquelles les mouvements de l'eau sont encore peu connus, toutes les plantes terrestres rejettent sans cesse de la vapeur dans l'atmosphère par le phénomène de la transpiration.

Par suite de cette exhalation aqueuse, les parties souterraines absorbent à chaque instant de nouvelles quantités d'eau, et par là introduisent dans e corps de la plante tous les matériaux nécessaires à la végétation, à l'exception du carbone et de l'oxygène. On voit ainsi que la transpiration est un des phénomènes les plus indispensables à la vie des plantes.

Il est essentiellement dépendant des conditions extérieures, température, radiation, état hygrométrique.

Influence de l'état hygrométrique sur la végétation. — Si dans une enceinte à température déterminée et constante, et à éclairement constant, on fait varier l'état hygrométrique de l'air, on constate aisément que l'intensité de la transpiration diminue quand l'état hygrométrique augmente, et augmente quand l'état hygrométrique diminue.

Quand l'atmosphère est saturée d'humidité, on peut se demander si la transpiration existe encore. Dans le cas où la température de l'enceinte et celle de la plante sont égales et maintenues rigoureusement constantes, la transpiration est nulle dans une atmosphère saturée. Mais il suffit qu'un léger excès de température se manifeste en faveur de la plante sur l'atmosphère ambiante, pour qu'en vertu du principe de Watt, la condensation de la vapeur d'eau dans la partie la plus froide détermine une transpiration d'autant plus active que l'excès de température est plus considérable. Ainsi, quand on expose une plante au soleil, après l'avoir placée sous une cloche en verre, cette plante se dessèche complètement.

Conséquences des variations de la transpiration. — Les variations de l'intensité de la transpiration exercent sur la marche de la végétation une influence manifeste qui se traduit parfois par des modifications de structure.

Effet produit par une atmosphère à état hygrométrique faible. — Considérons en effet une plante en pleine végétation séjournant dans une atmosphère dont l'état hygrométrique est faible; la transpiration devient très active et, bientôt, l'absorption de l'eau par les racines souterraines est insuffisante à compenser les pertes d'eau provoquées par l'évaporation : la turgescence diminue et les organes foliacés se fanent. Ce fait se présente fréquemment en été, chez les arbres de nos promenades, notamment les marronniers, après les chaudes journées de l'été. Pendant la nuit, l'état hygrométrique augmente par suite de l'abaissement de la température, la transpiration diminue et l'absorption de l'eau devient d'abord égale, puis supérieure à la perte due à l'évaporation; la plante reprend peu à peu sa turgescence et les feuilles s'étalent de nouveau.

Quand la restitution nocturne de l'eau est rendue impossible par suite de la sécheresse du sol, la déperdition produite par la transpiration devient peu à peu assez grande pour faire disparaître l'eau de végétation, et la mort survient. Si c'est une plante annuelle, la plante disparaît entièrement; si c'est une plante vivace, les organes aériens seuls disparaissent, et les organes souterrains, rhizomes, bulbes, oignons, passent en état de vie ralentie jusqu'au retour de la saison humide.

Effet produit par une atmosphère voisine de son état de saturation. — Inversement, si nous considérons une plante placée dans un milieu dont l'air est chargé d'humidité, la transpiration sera très faible ou nulle, et par suite la plante devient incapable de se débarrasser de l'excès d'eau apporté par les organes souterrains : tous les tissus se gorgent d'eau, et les diverses parties de la plante acquièrent des dimensions considérables. Au bout d'un certain temps, la quantité d'eau renfermée dans les tissus a atteint la limite extrême et la plante meurt.

Moyens de protection de la plante contre l'excès ou le défaut de transpiration. — Les régions du globe où l'état hygrométrique de l'atmosphère demeure très faible pendant une longue période sont nombreuses, et cependant ces régions ne sont pas dépourvues de végétation. Les plantes peuvent donc s'adapter à ces conditions spéciales.

Plusieurs dispositions anatomiques concourent à ce but.

C'est d'abord l'épaississement de la cuticule, et des couches cuticulaires de l'épiderme des feuilles, qui deviennent coriaces et luisantes, comme dans le laurier, l'olivier, le myrte.

C'est ensuite le développement d'un revêtement pileux, comme dans les armoises des régions des steppes.

C'est la réduction du nombre des stomates ou même leur complète disparition, notamment chez les orchidées à pseudo-bulbes qui, après la période de végétation, persistent pendant des mois avec leurs tissus gorgés d'eau, sans se dessécher.

C'est enfin la réduction ou la disparition des surfaces foliacées qui diminuent la surface évaporante, et le remplacement de ces organes par des épines ou des piquants.

Le type des végétaux chez lesquels l'adaptation aux milieux secs est le

plus complète, est fourni, dans le midi de l'Europe, par la forme *Spartium*, et dans le domaine des prairies, en Amérique, par la forme *Cactus*.

Inversement, les végétaux qui s'acclimatent dans les régions où l'état hygrométrique est souvent voisin de l'état de saturation, sont caractérisés par le faible développement de la cutinisation, par l'abondance des stomates, par la grande surface foliaire. Lorsque ces diverses modifications sont encore insuffisantes pour favoriser la déperdition nécessaire de l'eau sans cesse introduite par les racines, les plantes présentent des stomates ou pores aquifères au moyen desquels s'élimine une quantité d'eau parfois considérable.

Influence des variations hygrométriques sur les échanges gazeux. — Comme la transpiration, le phénomène respiratoire et le phénomène chlorophyllien sont influencés par les variations hygrométriques. Les données fournies à ce sujet sont peu nombreuses. On voit seulement, en ce qui concerne le phénomène respiratoire, que son intensité, faible dans une atmosphère pauvre en vapeur d'eau, augmente avec l'état hygrométrique jusqu'à une certaine limite à partir de laquelle l'augmentation est nulle ou très faible. Ces faits ont été mis en évidence par les recherches de M. Jumelle sur les lichens, plantes qui peuvent supporter sans périr une dessiccation prolongée.

Les chiffres suivants, empruntés au travail de MM. Bonnier et Mangin sur les champignons, mettent bien en évidence l'action de l'humidité sur la respiration.

	Degrés de l'hygromètre.	Acide carbonique produit.
Agaricus campestris (2 heures)	50-70°	2,6
	70-80°	3,4

Influence des variations hygrométriques sur la croissance. — *Hydrotropisme.* — Quand on examine un organe en voie de croissance dans des milieux dont l'air possède un état hygrométrique variable, toutes choses égales d'ailleurs, on constate que la croissance n'est pas la même. Il se produit à cet égard, dans la tige et dans la racine, des phénomènes différents que l'on s'est borné jusqu'ici à constater sans en rechercher la cause.

Ainsi, quand une racine s'accroît dans une atmosphère dont l'état hygrométrique a une valeur moyenne, si elle se trouve au voisinage d'un corps humide, elle dévie de sa direction, et s'incline du côté du corps très humide, même lorsqu'elle est soumise au géotropisme absolu, comme cela se présente dans les racines principales.

Il se produit alors une courbure concave du côté de la surface humide, qui amène contre cette dernière la pointe de la racine. L'action produite ainsi par les surfaces humides est appelée *hydrotropisme*, et les courbures qu'elle provoque sont les courbures *hydrotropiques*.

Les courbures qui dirigent l'extrémité des racines vers les milieux les plus humides se produisent fréquemment dans la nature ; elles expliquent pourquoi les racines des arbres qui croissent au bord des cours d'eau se dirigent vers ceux-ci, pourquoi les racines des plantes s'introduisent dans

les tuyaux de drainage, et les obstruent en y formant les bouquets connus sous le nom de *queues de renard.*

Si l'on examine non plus des racines, mais des tiges, l'influence des variations hygrométriques se traduit aussi par des courbures hydrotropiques, mais ces courbures se produisent en sens inverse, les tiges s'infléchissant vers le milieu le plus sec.

Cela tient à ce que, dans les tiges, l'accroissement est plus intense dans un milieu humide que dans un milieu sec, tandis que c'est l'inverse pour la racine. On s'explique ainsi le nom d'*hydrotropisme négatif* appliqué à la tige. Mais on n'a pas encore essayé d'expliquer ces différences d'action.

Effets mécaniques produits par les variations hygrométriques sur les tissus morts. — Les phénomènes que nous venons d'examiner ont lieu dans des cellules vivantes, et résultent d'une influence exercée sur la masse protoplasmique. Il nous reste à signaler les effets mécaniques qui résultent des contractions ou des tensions déterminées par la privation d'eau ou l'absorption dans des tissus morts. Ces phénomènes, purement physiques, ont cependant une grande importance biologique.

Signalons notamment la déhiscence des étamines, la déhiscence des fruits, la déhiscence des sporanges de cryptogames qui a pour effet de mettre en liberté le pollen, les graines, les spores. L'examen détaillé de ces phénomènes nous entraînerait hors des limites attribuées à ce paragraphe; nous nous bornerons à en donner le principe en prenant comme exemple la déhiscence des anthères. Lorsqu'on examine une anthère mûre, on constate que les deux loges dont elle est creusée, et qui résultent de la fusion de quatre sacs polliniques deux par deux, sont limitées du côté où l'anthère doit s'ouvrir par deux assises cellulaires : l'une extérieure, dont les cellules ont des parois minces, est formée par l'épiderme; l'autre intérieure constitue l'*assise mécanique.* Les cellules qui les composent présentent des épaississements simples ou ramifiés en forme de rubans ou de cordons sur toutes les faces, sauf une, ordinairement la face externe dont la membrane reste mince.

Tant que la corolle reste fermée, l'évaporation des tissus est molle ou très faible; mais, dès que la corolle s'ouvre, les anthères se dessèchent rapidement. En conséquence, toutes les membranes éprouvent, du fait de la dessiccation, une rétraction plus ou moins grande. Dans l'assise mécanique, la paroi externe demeurée mince se dessèche plus vite que les parois internes et radiales pourvues d'épaississements. Il en résulte des tractions qui déterminent la courbure en dehors des faces convexes de l'anthère, et l'agrandissement de la fente qui s'est produite suivant la ligne médiane de chaque loge (iris, ancolie, etc.). Parfois la fente n'existant pas au moment où les tractions se produisent dans la paroi de l'anthère, celle-ci se déchire brusquement, et la déhiscence a lieu par une sorte d'explosion.

L'ouverture d'un grand nombre de fruits a lieu par un mécanisme analogue dont la cause purement physique est due à la structure hétérogène des organes. Beaucoup de ces objets peuvent alors être employés comme hygromètres, car ils éprouvent, suivant les variations hygrométriques, des

mouvements plus ou moins rapides : tels sont les akènes de certains *Erodium*.

Les mouvements des dents qui forment le péristome de l'urne des mousses, les mouvements et les déplacements des spores munies d'élatères, comme celles des prêles, sont dus à la même cause.

Bonnier et Mangin, Recherches sur la respiration et la transpiration des champignons (*Ann. Sc. nat.*, *Bot.*, 6e série, t. XVII, 1884).

Sachs, Abbukung der Wurzelu von ihr normalen Wachselhumsrichtung durch feechte Kör-per (*Arb. d. But. Inst. in Wurzb.*, 1872).

Sachs, *Manuel de physiologie végétale*, 1868 (traduction française).

Deherain, Sur l'évaporation de l'eau par les feuilles (*Ann. Sc. nat.*, 5e série, t. XII).

Haberlandl, Ueber die Grösse der Transpiration unierer Culturpflauzen (*Am. prackt. Unters.*, II, 1877).

Grisebach, *La végétation du globe*, 1874 (traduction française).

Leclerc du Sablon, Recherches sur la déhiscence des fruits à péricarpe sec (*Ann. Sc. uai.*, 6e série, t. XVII, 1884).

Hildebrand, Die Schieuderfrüchte und ihr im anatomischen Bau. begrundeter mechanismus (*Jahr. f. Wisseus. Bot.*, IX, 1873).

Leclerc du Sablon, Recherches sur la structure et la déhiscence des anthères (*Ann. Sc. nat.*, *Bot.*, 7e série, t. I, 1885).

INFLUENCE DE LA CHALEUR SUR LES VÉGÉTAUX

Par M. MANGIN.

Les phénomènes d'oxydation qui s'accomplissent dans le corps des êtres vivants sont les sources de l'énergie nécessaire aux réactions chimiques internes, à la production du travail mécanique, de l'électricité, de la lumière, etc.

La chaleur de combustion n'est pas tout entière absorbée par ces manifestations diverses de l'énergie, et l'excès non utilisé contribue à entretenir la température propre de l'être. A l'exception des mammifères et des oiseaux qui produisent une assez grande quantité d'énergie pour maintenir leur corps à une température constante, tous les autres êtres vivants, et en particulier les végétaux, sont incapables de réparer les pertes par rayonnement et se mettent plus ou moins rapidement en équilibre avec le milieu ambiant.

La température de ces êtres suit donc nécessairement les fluctuations de la température du milieu ambiant, et présente comme cette dernière des variations diurnes ou saisonnières d'une grande amplitude. — Nous sommes par suite amenés à rechercher l'influence que ces variations peuvent exercer sur les phénomènes de la vie.

Si, partant d'une température moyenne θ on élève ou on abaisse progressivement la température du milieu ambiant, la température de la plante s'élève ou s'abaisse aussi, et à ces diverses températures, les phénomènes de la vie qui se traduisent extérieurement par l'accroissement du corps, par les échanges gazeux, par les mouvements ou l'irritabilité de la substance vivante, présentent une intensité qui décroît progressivement jusqu'à une certaine valeur $t > \theta$ et $t' < \theta$.

Au-dessous de t' et au-dessus de t la croissance ne se manifeste plus, pas plus que l'irritabilité, et la plante passe à l'état de vie ralentie caractérisée par la permanence des échanges gazeux, bien que ceux-ci soient très affaiblis; la plante devient inerte, elle paraît morte, mais elle est toujours vivante, car, si on la ramène à une température comprise entre t et t', elle repasse à l'état de vie active. Si, en dehors des limites t et t', la température continue à s'élever ou à s'abaisser, elle prend bientôt des valeurs $T > t$ et $T' < t'$ pour lesquelles la plante meurt, car, dès qu'on la ramène entre les températures t et t', elle ne manifeste plus aucun des phénomènes de la vie.

On peut donc distinguer quatre températures critiques pour la vie des

plantes : une température inférieure T' pour laquelle et au-dessous de laquelle la vie cesse ; une température $t' > T'$ où la vie active commence à se manifester, tandis que dans la période $T't'$ la plante était en état de vie ralentie ; une température $t > t'$ pour laquelle la vie active cesse de se manifester et est remplacée par la vie ralentie qui se manifeste jusqu'à la température $T > t$ à partir de laquelle la mort est fatale.

Ces quatre températures critiques limitent trois périodes : une période moyenne de vie active, et deux périodes extrêmes de vie ralentie ; pour ces deux dernières, la période inférieure $T' t'$ est généralement plus longue que la période supérieure Tt. Celle-ci devient parfois si courte qu'il est difficile de la mettre en évidence, à cause de la lenteur avec laquelle l'équilibre thermique s'établit pour certains êtres.

Dans la période moyenne tt', qui caractérise la vie active, les phénomènes de la vie ne présentent pas la même activité. Si l'on élève progressivement la température à partir de t, les phénomènes de la vie : croissance, échanges gazeux, absorption, mouvement du protoplasme, etc., augmentent régulièrement d'intensité jusqu'à une température θ ; celle-ci dépassée, l'intensité des phénomènes diminue graduellement jusqu'à la température t' pour laquelle la plupart des phénomènes cessent de se manifester. La température θ qui correspond à l'intensité la plus grande des diverses fonctions de la vie est désignée sous le nom d'*optimum*.

Quelques exemples permettent de préciser l'importance des températures critiques.

Considérons d'abord le phénomène le plus général, le passage de la vie ralentie à la vie active, qu'on observe dans la germination des graines.

	Limite inférieure (degrés).	Optimum (degrés).	Limite supérieure (degrés).
Blé	5	28,7	42,5
Orge	5	28,7	37,7
Cucurbita Pepo	13,7	33,7	46,2
Haricot	9,5	33,7	46,2
Maïs	9,5	33,7	46,2
Lin	1,8	21	28
Pois	6,7	26,6	»
Sésame	13	25	45

Ces températures sont celles entre lesquelles la germination peut se produire.

Quant aux températures extrêmes, capables de tuer la graine en état de vie ralentie, les données que nous possédons à ce sujet sont peu nombreuses.

En général, le refroidissement à une température de — 80° est sans action sur les graines. D'autre part, l'élévation de la température est plus facilement et rapidement mortelle. Si les graines de blé, de maïs, supportent sans périr, dans l'air sec, la température de 100° pendant un quart d'heure, de 65° pendant une heure, elles sont tuées par le séjour d'une heure dans l'eau à la température de 53 à 54 degrés.

Variation des températures limites avec la nature des phénomènes de la vie. — Les diverses fonctions qui s'accomplissent dans la plante en état de vie active ne s'accomplissent pas toutes à la même température ; il y a pour

chacune d'elles des conditions particulières de température dont la détermination n'est possible que pour celles de ces fonctions qui se traduisent extérieurement par un phénomène tangible.

Prenons à titre d'exemple la végétation d'une algue, d'une bactérie, le *bacillus anthracis.*

Lorsqu'on cultive cette espèce dans un milieu convenable, on s'aperçoit que la végétation, qui se traduit par la multiplication des bâtonnets, commence à 12° pour cesser à 45° ; mais si l'on étudie la formation des spores, on voit qu'elles ne commencent à se former qu'à 15°, et cessent d'apparaître à 43°. Ces différences ont reçu une application importante dans la recherche des vaccins du charbon : une culture maintenue à l'air à une température nférieure à 43° ne s'atténue pas par suite de la formation rapide des spores ; si elle est maintenue à une température un peu supérieure à 43°, la formation des spores n'a plus lieu, et la virulence des cultures s'atténue progressivement jusqu'à devenir nulle.

D'autre part, si nous prenons comme exemple la croissance des racines, dont l'intensité peut être mesurée aisément, nous obtenons les chiffres suivants :

	Limite inférieure (degrés).	Optimum (degrés).	Limite supérieure (degrés).
Lin	15	27,5	37
Moutarde	15	27,5	17
Maïs	16	33,5	38,5
Fourrage	13,5	27,5	37

Influence de la chaleur sur les diverses fonctions. — Examinons maintenant, pour diverses fonctions bien déterminées, l'influence exercée par les variations de température.

Croissance, thermotropisme, courbures thermotropiques. — Nous venons de voir que la croissance comprise entre certaines limites de température est inégale pour toutes les températures comprises entre ces limites, et présente un optimum variable pour chaque espèce.

Si nous considérons alors un organe orthotrope, disposé de manière à être exposé sur ses deux faces à des températures différentes, dont la plus élevée ne dépasse pas l'optimum, la face exposée à la température la plus élevée s'accroît plus vite que la face opposée, et l'axe de l'organe se courbe en infléchissant son extrémité avec la région la moins chaude ; si les deux températures sont supérieures à l'optimum de manière que la plus basse ne descende pas au-dessous de sa valeur, il se produit aussi des courbures qui infléchissent l'extrémité vers l'espace le plus chaud.

On a appelé *thermotropisme* l'action fléchissante provoquée par les températures différentes, agissant sur les faces opposées de la tige, et *courbures thermotropiques*, les déformations consécutives à cette action.

Remarquons que ces déformations ont lieu par un mécanisme différent de celles que produit l'action de la pesanteur. Ici l'influence de la chaleur se manifeste immédiatement par une action directe sur la croissance, tandis que la pesanteur exerce d'abord son action sur une région sensible géotropiquement, mais incapable de réagir, et c'est l'excitation perçue par la

région sensible qui, transmise à la région de croissance insensible, détermine dans cette dernière les courbures géotropiques.

Le *thermotropisme* s'observe sur toutes les racines et les tiges, mais, en ce qui concerne la racine principale dont le géotropisme est absolu et puissant, il est nécessaire pour l'observer d'égaliser les actions de la pesanteur sur la plante au moyen d'un clinostat ; les racines secondaires et les racines tertiaires, faiblement ou pas du tout géotropiques, se montrent très sensibles à l'influence des températures inégales. C'est probablement cette influence, jointe, comme nous le verrons plus loin, à l'influence des variations d'humidité, qui est l'unique cause des directions variées que les radicelles poussent naturellement dans le sol.

En ce qui concerne les tiges, l'influence du thermotropisme est assez forte pour triompher du géotropisme et il suffit, pour en constater les effets, de disposer celles-ci dans une cloison faiblement conductrice séparant deux espaces portés à des températures différentes.

Action de la chaleur sur les échanges gazeux. — Nous devons distinguer parmi les échanges gazeux : le phénomène respiratoire et le phénomène chlorophyllien.

Phénomène respiratoire. — Le phénomène respiratoire, c'est-à-dire l'absorption d'oxygène et le dégagement d'acide carbonique, est, de tous les phénomènes de la vie, le plus constant, sinon le seul constant, et la constatation de ses effets, entre les températures extrêmes de la vie T et T', suffit pour affirmer l'existence de la vie chez un être.

On sait en effet, par les recherches de MM. Van Tieghem et Bonnier, que les graines sèches, placées pendant plusieurs mois dans un espace clos et de très petit volume, exhalent de l'acide carbonique et absorbent de l'oxygène en quantité suffisante pour faire disparaître ce dernier gaz dans l'atmosphère ambiante.

L'influence de la température se manifeste sur le phénomène respiratoire d'une manière différente de celle qu'offrent les autres phénomènes de la vie. En effet, si aux diverses températures croissantes depuis T, limite inférieure, on mesure le volume ou le poids des gaz échangés et que l'on construise, avec les chiffres obtenus comme ordonnées, la courbe des variations de l'intensité respiratoire, on obtient, pour les plantes les plus diverses, des paraboles dont l'axe est perpendiculaire à l'axe des abscisses. La figure 590 exprime les résultats obtenus pour des espèces très différentes, d'après les recherches de MM. Bonnier et Mangin.

On voit que, l'intensité de la respiration croissant jusqu'aux températures extrêmes de la vie, il n'y a pas d'*optimum*.

Dans un travail récent, M. Detmer a contesté ces conclusions et admis l'existence d'un optimum ; il se fonde sur ce fait, qu'à partir d'une certaine température, la quantité d'acide carbonique produit diminue progressivement jusqu'à la mort de la plante. Ce résultat est exact; mais pour établir qu'il existe réellement une température optimum pour la respiration, il faudrait montrer que la diminution des échanges gazeux est due à l'affaiblissement de la faculté respiratoire, et non à un commencement d'altération des tissus

vivants provoqué par la température élevée. Or, il résulte des résultats fournis par M. Detmer lui-même, que les tissus portés chez le lupin à des températures dépassant l'optimum sont altérés; en effet, si la production d'acide carbonique par heure, avant et après le séjour dans une étuve à 35°

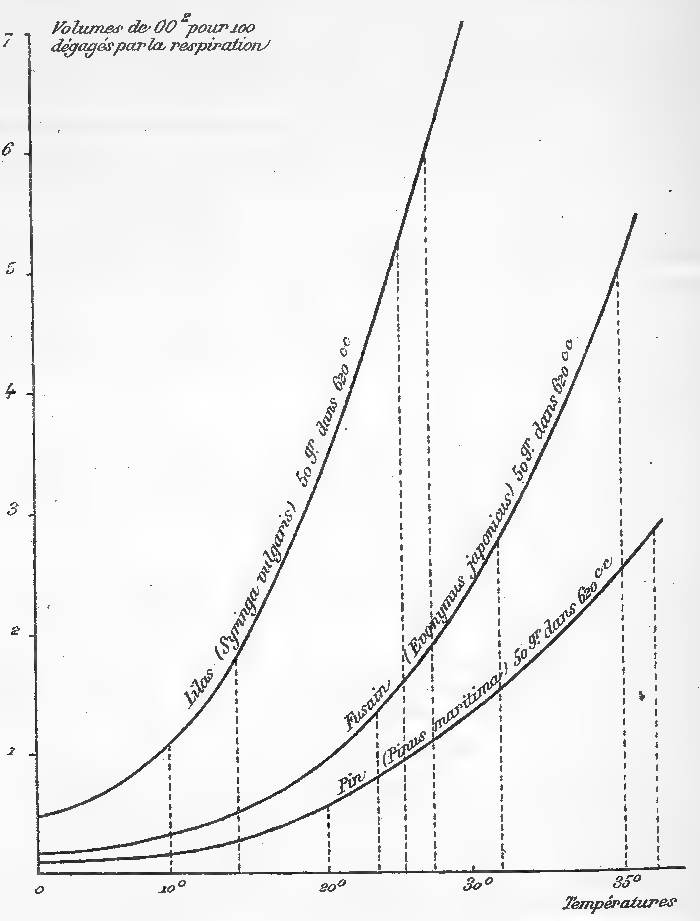


Fig. 590. — Courbes représentant la variation de l'intensité respiratoire avec la température.

pendant cinq heures, demeure la même, il n'en est plus ainsi quand la plante est portée à 42 ou 43° (l'optimum étant à 40°). Les plantules qui dégageaient à 20° $34^{mmc},75$ d'acide carbonique par heure, n'ont plus produit, dans le même temps, et à la même température, que $23^{mmc},30$ après avoir été portées pendant trois heures à la température de 42 et 43 degrés.

Il n'y a donc pas lieu d'admettre l'existence d'un optimum de température pour le phénomène respiratoire.

Phénomène chlorophyllien ou assimilation du carbone. — Ce phénomène consiste, comme on le sait, en une absorption d'acide carbonique qui, sous l'influence des radiations absorbées par la chlorophylle, est décomposé;

le carbone est employé à la formation des hydrates de carbone, et l'oxygène est exhalé.

La température intervient à un double titre, d'abord pour favoriser ou retarder la formation de la chlorophylle, ensuite pour accélérer ou ralentir la décomposition de l'acide carbonique.

Si, chez la plupart des plantes vertes, les radiations thermiques sont insuffisantes à provoquer le verdissement, leur influence n'est pas négligeable, puisqu'elles amènent les plantes à la température la plus favorable à l'apparition du pigment. En effet, M. Wiemer a reconnu que, toutes choses égales d'ailleurs, il existe, pour la production de la chlorophylle, trois températures critiques : une limite inférieure, une limite supérieure, en deçà et au delà desquelles le verdissement ne se produit pas, et une température optimum. Ces températures varient avec l'espèce de plante employée, comme le montre le tableau suivant :

Plantes.	Limite inférieure (degrés).	Optimum (degrés).	Limite supérieure (degrés).
Orge	4,5	30	37-38
Maïs	10	35	40
Radis	10	35	45
Pois	4-5	35	40

En ce qui concerne la décomposition de l'acide carbonique, pour une plante donnée, toutes choses égales d'ailleurs, l'intensité du phénomène croît régulièrement avec la température et il ne paraît pas exister d'optimum, à moins que sa valeur ne dépasse 30°. Comme pour la respiration, l'assimilation chlorophyllienne est déjà importante à de basses températures. Ainsi, elle est manifeste pour le mélèze à 0°,5 et 2°,5, pour les graminées des prairies entre 1°,5 et 3°,5.

M. Jumelle a montré, en étudiant les lichens et les mousses, que l'assimilation se comporte autrement que le phénomène respiratoire. Quand on expose des lichens pendant longtemps à des températures croissantes et qu'on les ramène à la température ordinaire pour mesurer les échanges gazeux, l'expérience montre qu'à 35° l'assimilation et la respiration sont encore intenses ; à 40°, l'assimilation est ralentie ; elle disparaît à 45°, tandis que la respiration est encore énergique. Pour obtenir un affaiblissement de la respiration, il faut porter certains lichens (*Physcia, Evernia*) à des températures de 50, 55, et même 60 degrés.

L'abaissement de la température produit des effets différents, car à — 10° le phénomène respiratoire est à peine sensible chez les lichens ; mais l'assimilation persiste encore chez l'*Evernia prunastri* après un séjour de quatre heures dans un milieu à — 20° et — 32° ; le genévrier commun assimile encore après un séjour de trois heures et demie à — 17 et — 38 degrés.

La disparition de l'assimilation par une élévation de température, sa persistance dans des organes exposés à un froid intense, où la respiration est presque supprimée, mettent bien en évidence l'indépendance de ces deux fonctions.

Absorption de l'eau et des substances solubles. — On ne connaît guère que l'influence exercée par les variations de température sur l'absorption de

l'eau, et encore les données sont-elles peu nombreuses. Les résultats connus montrent que les plantes présentent à ce sujet des exigences très différentes; tandis qu'à 3 ou 5° les racines de tabac ou de courge n'absorbent plus qu'une quantité d'eau insuffisante pour contre-balancer les pertes dues à l'évaporation, les racines du chou, plongées dans un sol refroidi à 0°, absorbent encore une quantité d'eau suffisante pour s'opposer au flétrissement. Quant à la marche du phénomène, les chiffres suivants, trouvés pour le saule, en donneront une idée :

Température des racines.	Quantité d'eau absorbée.
11°	0,20
15	0,24
18	0,42 — Optimum.
25	0,17
28	0,27

Mouvements du protoplasme. — Les variations de température sont, parmi les diverses causes externes, celles qui ont l'influence la plus importante sur les mouvements du protoplasme.

Le tableau suivant donne une idée de cette influence :

	Limite inférieure (degrés).	Optimum (degrés).	Limite supérieure. (degrés).
Chlamydococcus pluvialis (mouvements des cils).............	5	»	43
Nitella flexilis................	0,5	37	37 +
Courge (poils)..................	10-11	30-40	50 +
Tradescantia (poils)............	10-11	30-40	49

Les variations brusques de température produisent une action que nous n'avions pas encore observée : l'arrêt momentané des mouvements.

Ainsi, dans un poil d'*Ecbalium agreste* refroidi brusquement de 40 à 16°, le mouvement du protoplasme cesse après une minute, pour reprendre sa vitesse normale au bout de vingt-huit minutes; le même phénomène se produit quand on porte brusquement le poil de 16 à 40 degrés.

La suppression momentanée des mouvements par des écarts brusques de température est comparable à l'effet produit par un ébranlement sur les feuilles de sensitive.

Sensibilité et mouvements périodiques. — La sensibilité que manifestent certaines plantes est influencée aussi par la température; nous ne citerons ici qu'un seul exemple qui confirme les données générales relatives à l'exercice de la vie. Chez la sensitive (*Mimosa pudica*), les mouvements provoqués se manifestent à 15° au moins, présentent un optimum à 50 et souvent 52°.

Il en est de même pour les mouvements provoqués. Parmi ces mouvements, ceux qui président à l'ouverture et à la fermeture des fleurs sont intéressants à signaler, car ils participent un peu, par leur relation avec la température, des variations brusques que nous avons signalées plus haut.

La plupart des fleurs ne s'ouvrent que dans certaines limites de température ; ainsi celle du safran (*Crocus*) ne s'ouvre qu'à partir de 8° et se ferme au delà de 28°; entre ces températures extrêmes, toute élévation de tempé-

rature ouvre la fleur, tout abaissement la ferme. Cette action est si sensible que l'on peut faire épanouir des fleurs fermées à l'obscurité en élevant leur température (ornithogale, anémones, ficaire, etc.).

On ne connaît pas encore le mécanisme de ces mouvements.

BONNIER et MANGIN, Recherches sur la respiration et la transpiration des champignons (*Ann. Sc. nat.*, 6e série, t. XVII, 1884). — Recherches sur la respiration des tissus sans chlorophylle (*Ibid.*, t. XVIII, 1884). — Recherches sur la respiration des feuilles à l'obscurité (*Ibid.*, t. XV, 1884).

BURKHARDT, *Werhandl. der naturforsch. Gesells. Bakt.*, II, 1858.

CANDOLLE (ALPH. DE), *Bibliothèque universelle* et *Revue suisse*, 1866.

DETMER, Untersuchungen über Pflanzen Athung. und über einige Stofwechselprocesse im vegetabilischen Organismus (*Berich. d. deuts. Bot. Gesells.*, t. VIII, 1890). — Untersuchangen über intramoleculäre Athmung d. Pflanzen (*Ibid.*, t. X, 1892).—Beobachtungen über die nermale Athmung der Pflanzen (*Ibid.* Ibid., t. X, 1892).

JUMELLE, Recherches physiologiques sur les lichens (*Rev. gén. de bot.*, t. IV).

PPEFFER, *Physiologische untersachungen*, 1873.

W. KÖPPEN, *Warme und Pflanzenwachsthum.* Moscou, 1870.

SACHS, *Physiologie végétale* (trad. franç., 1868). — *Jahr. f. Wiss. Botanik*, 1860.

DE VRIES (HUGO), *Archives néerlandaises*, V, 1870.

J. WIESNER, Recherches sur l'influence de la lumière et de la chaleur rayonnante sur la transpiration des plantes (*Ann. Sc. nat.*, *Bot.*, 6e série, IV, 1887). — Id., *Die Entstehung des Chlorophylls in der Pflanze.* Wien, 1877.

ACTIONS MÉCANIQUES SUR LES VÉGÉTAUX

Par M. MANGIN.

Le développement du corps des végétaux se produit dans des conditions différentes de celles qui président à l'établissement du corps des animaux ; la présence d'un revêtement solide autour de chaque cellule et, par suite, l'immobilité plus ou moins complète à laquelle les végétaux sont soumis, rendent ces êtres sensibles à des influences qui, chez les animaux, sont peu marquées.

Parmi ces influences, nous signalerons dans ce chapitre les actions mécaniques, c'est-à-dire les modifications provoquées sur la direction ou l'orientation des végétaux, par la pesanteur, par les pressions ou les chocs.

I. — ACTION DE LA PESANTEUR

Le corps des plantes est rarement sphérique ; le plus souvent il présente trois axes inégaux, dont l'un plus développé que les deux autres sert à fixer la longueur du corps ; on le désigne sous le nom d'axe du corps ; c'est souvent l'axe de symétrie ou la ligne par laquelle passe le plan de symétrie. Quand on examine le développement du corps des plantes les plus diverses, on remarque, chez certaines espèces peu nombreuses, que l'axe du corps n'a pas une direction définie dans l'espace. Le thalle de certaines algues filamenteuses, de certaines muscinées, des lichens, s'oriente indifféremment dans les directions les plus diverses ; de semblables plantes sont indifférentes vis-à-vis de l'action de la pesanteur.

Le plus souvent, on constate, pendant le développement, que l'axe du corps prend une direction constante, soit la direction verticale, soit une direction qui forme avec la verticale un angle déterminé ; les phanérogames et la plupart des cryptogames sont dans ce cas.

Quand l'axe du corps est confondu avec la verticale ou forme avec celle-ci un angle de faible valeur, le corps est dit *orthotrope* : c'est le cas de la racine de la tige.

Si l'axe du corps est horizontal ou voisin de l'horizontale, on dit que le corps est *plagiotrope* : c'est le cas de certaines tiges, des feuilles, du thalle d'un certain nombre de cryptogames.

Dans tous les cas, le corps est polarisé vis-à-vis de la pesanteur.

C'est chez les plantes vasculaires : cryptogames vasculaires et phanérogames dont le corps est différencié en tige, feuille et racine, que la polarisation se manifeste le plus nettement. Chez toutes les plantes que nous voyons habituellement, les racines s'accroissent en se dirigeant de haut en bas ; la tige et les rameaux se dirigent au contraire de bas en haut. Si on les déplace de la direction verticale, elles se courbent plus ou moins rapidement, et les parties nouvellement formées reprennent la direction verticale.

Ch. Bonnet et Dodart ont attiré d'abord l'attention sur ces phénomènes d'orientation, qu'ils confondaient avec l'influence de la lumière. Duhamel montra le premier que la direction particulière des tiges et des racines est indépendante de l'air, du sol, de l'humidité et de la lumière ; il soupçonnait bien que la pesanteur ne devait pas demeurer étrangère à ce phénomène, mais il ne formula pas d'hypothèse ferme.

Knight, en 1806, publia ses observations, devenues classiques, sur les expériences de rotation, et émit l'idée que la tendance des racines et des tiges à se diriger de haut en bas ou de bas en haut est due à l'action de la pesanteur.

Cette action est désignée sous le nom de *géotropisme*, et les courbures qu'elle provoque sont les *courbures géotropiques*.

Preuve de l'influence de la pesanteur sur la direction de la tige et de la racine. — Les expériences de rotation permettent de montrer que la pesanteur est la cause de la polarité du corps des plantes. On fixe une plante en voie de croissance au bord d'un disque qui se meut uniformément autour d'un axe horizontal. La rotation du disque ayant lieu assez lentement pour que l'action de la force centrifuge soit négligeable (un tour en vingt minutes d'un disque de 10 centimètres de diamètre est suffisant pour cela), on voit que dans une rotation complète, la pesanteur agit successivement de la même manière sur toutes les parties de la plante; par suite, comme l'action fléchissante qu'elle exerce en chacun des points n'est pas immédiate, toutes ses actions s'égalisent, et la plante ne réagit plus sous l'action de la pesanteur.

On remarque en effet que, quelle que soit l'orientation qu'on a donné à l'axe du corps en fixant les individus sur le disque, la croissance de la tige et de la racine se produit dans la direction où elles ont été placées.

Action de la force centrifuge. — Si l'on imprime au disque une rotation plus forte de 50, 100 ou 200 tours par minute, les actions fléchissantes dues à la pesanteur s'équilibrent toujours, mais la force centrifuge prend une intensité croissante et détermine bientôt des flexions qui déterminent l'orientation des parties de l'axe, formées pendant la rotation, suivant le rayon : la racine s'accroît de dedans en dehors, c'est-à-dire suivant la direction de la force centrifuge ; la tige croît de dehors en dedans, c'est-à-dire en sens inverse de la direction de la force centrifuge.

La force centrifuge agit donc sur les plantes anisotropes exactement de la même manière que la pesanteur; ces deux forces infléchissent la racine et la dirigent dans leur sens, tandis que la tige se dirige en sens inverse. Cette double influence explique les termes de *géotropisme négatif* employé pour désigner l'action de la pesanteur de la tige, et de *géotropisme positif* appliqué à la racine ou aux parties du corps qui se comportent comme elle.

Action simultanée de la pesanteur et de la force centrifuge. — Si, comme l'a fait Knight, on fixe des plantes en voie de croissance, non plus sur un disque vertical, mais sur un disque horizontal animé d'un mouvement de rotation rapide et constant pour une expérience donnée, la plante n'est plus égalisée vis-à-vis de la pesanteur et réagit en outre sous l'action de la force centrifuge. L'influence combinée de ces deux forces ne tarde pas à se traduire par une orientation des parties de l'axe, formées pendant l'expérience, suivant la composante de ces forces, les racines se dirigeant obliquement en bas et en dehors, les tiges obliquement en haut et en dedans, c'est-à-dire sur l'axe de rotation.

L'action de la pesanteur est progressive. Induction géomécanique. — Les courbures géotropiques produites dans un corps orthotrope quand son axe est incliné sur la verticale ne se produisent qu'au bout d'un certain temps ; elles ont lieu même après que la plante a été replacée dans des conditions où ces courbures s'égalisent.

Ainsi, une plante étant disposée de manière que son axe demeure horizontal pendant une ou deux heures, n'a pas encore manifesté par des courbures l'action de la pesanteur ; à ce moment, on la place sur un disque vertical à rotation lente, et l'on constate que la tige et la racine se courbent à angle droit de la première position.

Ainsi l'effet produit persiste après que la cause a cessé d'agir ; il y a donc un phénomène d'induction désigné sous le nom d'induction géomécanique.

Siège des courbures géotropiques. — Les diverses observations faites sur les plantes ou parties de plantes sensibles à l'action de la pesanteur montrent que c'est exclusivement dans la région de croissance que se produisent les courbures géotropiques. Quand la croissance a cessé, quelle que soit la direction que l'on donne à la plante, cette direction n'est pas influencée par la pesanteur. En outre, dans la région de croissance, le maximum des courbures géotropiques correspond à peu près au maximum de croissance.

Dans certains organes cependant, tels que les feuilles des légumineuses, le renflement qui se trouve à la base des pétioles primaire et secondaire est encore sensible à l'action de la pesanteur dans les feuilles âgées, dont la croissance est achevée.

Effort développé par les organes manifestant les courbures géotropiques. — Lorsque les plantes réagissent sous l'influence de la pesanteur par les courbures géotropiques, elles exercent un effort assez considérable. L'un des exemples les plus nets de la puissance développée pendant la courbure nous est offert par les nœuds des graminées, qui, longtemps après que la croissance a cessé dans la feuille et la tige, sont encore capables de réagir par des courbures géotropiques quand un accident couche les chaumes vers le sol.

Une tige de blé ou de maïs étant placée horizontalement, on voit l'un des nœuds s'accroître beaucoup à sa face inférieure convexe ; la croissance n'a pas lieu à la face supérieure qui devient concave. Il se forme un coude qui redresse toute la portion de la tige superposée au nœud ; l'intensité de l'effort développé au niveau de la courbure est très considérable, car la tige redressée a parfois 1 mètre de hauteur et se termine par un épi.

L'influence de la pesanteur est inégale sur les diverses parties de la plante. — L'action de la pesanteur sur les diverses parties d'une plante n'est pas constante ; il est intéressant d'examiner comment elle se traduit dans les divers membres :

Racine. — Le système radical est constitué par une racine principale sur laquelle se développent des racines de deuxième et troisième ordre, dont l'ensemble forme les radicelles. Sur la racine principale, le géotropisme se manifeste par des courbures toutes les fois que l'axe d'accroissement ne coïncide pas avec la verticale ; le géotropisme est absolu ; il impose à la racine primaire une orientation rigoureusement verticale ; pour les racines secondaires, les effets de la pesanteur sont différents, car celles-ci prennent, en s'accroissant, une direction qui fait avec la verticale un angle déterminé, variable pour chaque plante, et même variable pour les diverses racines secondaires d'un même pivot.

Prenons un vase renfermant des racines secondaires orientées de manière à former, avec la verticale, l'angle imposé par le géotropisme ; déplaçons le vase d'un angle déterminé ; au bout d'un certain temps, toutes les racines secondaires se seront accrues en prenant une courbure qui leur fait décrire exactement l'angle dont le vase a été déplacé.

Quant aux racines de troisième ordre et au-dessus, elles sont indépendantes vis-à-vis de la pesanteur et s'accroissent dans toutes les directions. En somme, la racine principale présente le géotropisme positif absolu ; les racines secondaires, le géotropisme oblique à divers degrés, et les racines de troisième ordre sont indifférentes.

Tige. — Abstraction faite du sens suivant lequel la pesanteur agit sur la tige, celle-ci se comporte comme les racines ; la tige principale est douée d'un fort géotropisme négatif, les tiges secondaires présentent un géotropisme négatif oblique ; l'angle qu'elles tendent à former avec la verticale pour que l'action de la pesanteur ne se traduise plus par des courbures est variable, et c'est aux différences qu'il présente que les divers arbres doivent leur port particulier. Ainsi, dans le peuplier d'Italie, les rameaux nés sur le tronc sont fortement géotropiques et se disposent presque parallèlement à ce dernier. Dans le sapin pectiné ou l'épicéa, ils forment avec la tige principale un angle d'assez grande ouverture. Quant aux branches d'ordre supérieur, elles sont souvent faiblement géotropiques.

Le géotropisme oblique des racines ou des tiges secondaires n'est cependant pas constant, et dans certaines conditions quelques-unes de ces ramifications apparaissent douées du géotropisme absolu qui caractérise la tige ou la racine principale. Ainsi, dans les Pyrénées, M. Vallot a signalé des sapins séculaires qui présentent l'aspect d'immenses chandeliers à 2, 3, 4 et 5 branches verticales. Chez ces plantes, même quand le tronc est intact, un certain nombre de branches de deuxième ordre se sont redressées dans la direction verticale après avoir crû d'abord à la manière normale, et les branches de troisième ordre, qui se développent sur elles, s'orientent en faisant le même angle que les branches normales portées par le tronc.

D'autre part, c'est un fait bien connu des jardiniers, que lorsqu'une racine

primaire est coupée, l'une des racines secondaires développées au-dessus de la section devient fortement géotropique et se dirige dans l'axe du pivot tronçonné comme pour remplacer la région décapitée. De même chez les conifères, les sapins par exemple, on voit de jeunes plants, ayant perdu leur tête sous l'action du vent ou de la foudre, refaire une tête au moyen d'une branche secondaire née au-dessous de la blessure et prolongeant en quelque sorte le tronc. Il n'est pas possible de prévoir quel sera le bourgeon dans lequel doit se localiser le géotropisme absolu qui existait dans la partie tronçonnée.

Feuille. — L'action de la pesanteur se manifeste dans les feuilles d'une manière toute particulière, puisqu'elle s'observe encore fréquemment dans les feuilles entièrement développées. Le résultat de cette action, qui se combine d'ailleurs avec le phototropisme, aboutit à orienter le limbe horizontalement, la face supérieure tournée en haut.

On peut observer ce fait très nettement en comparant les feuilles de deux branches, l'une orientée verticalement, l'autre orientée horizontalement: dans la première, le plan du limbe est perpendiculaire à l'axe de la branche; dans la seconde, il est confondu avec ce dernier. Si l'on coupe une branche qui était orientée dans un plan horizontal et qu'on la dispose dans un vase rempli d'eau, de manière qu'elle soit verticale, au bout de quelques heures on constate que toutes les feuilles se sont tordues de 90° autour de leur pétiole pour reprendre la situation horizontale. Ce phénomène se produit dans l'obscurité comme à la lumière, et on a pu le renouveler jusqu'à quatorze fois pour la même feuille. Si on équilibre les actions de la pesanteur en fixant un rameau sur un disque vertical à rotation lente, les torsions des pétioles ne se manifestent pas. C'est donc bien au géotropisme qu'est due l'orientation du limbe des feuilles.

Fleur. — La fleur, qui morphologiquement est un rameau feuillé métamorphosé, ne pouvait pas être soustraite aux influences modificatrices de la pesanteur. En effet, quand c'est le pédoncule qui est sensible, il manifeste cette sensibilité en se dirigeant de bas en haut comme la tige (aconit, marronnier); quand la sensibilité existe dans les feuilles florales, celles-ci s'orientent comme les feuilles normales, en étalant leur lame dans un plan voisin de l'horizontale.

Explication des phénomènes. — Les faits précédents mettent en évidence l'influence de la pesanteur sur les racines, les tiges et les feuilles; il reste maintenant à expliquer de quelle manière cette action s'exerce, et comment elle peut se traduire dans la tige et la racine par des courbures inverses.

Hypothèse de Knight. — Knight émit le premier, à la suite de ses expériences sur les phénomènes de rotation, la théorie qu'Hofmeister et Sachs ont reprise et développée. D'après Knight, l'extrémité des racines est encore tendre et délicate; à son passage de l'état liquide à l'état solide, elle est encore influencée par la pesanteur, et se dirige verticalement en bas: quant à la tendance des tiges à se diriger en haut, elle est simplement due à l'extension des parties déjà organisées.

Hypothèse d'Hofmeister et de Sachs. — Hofmeister distingue les tissus

sans tension des tissus doués de cette propriété; il croit que l'influence de la pesanteur dans un sens ou dans l'autre résulte de la distribution de ces deux sortes de tissus dans les jeunes organes.

Sachs approuva d'abord l'explication proposée par Hofmeister, et dans son ouvrage sur la *Physiologie végétale* il s'exprime ainsi :

« Si nous voyons généralement les organes souterrains (racines, stolons) se diriger obliquement ou perpendiculairement par le bas, tandis que c'est le contraire pour les parties aériennes, j'attribue ce fait à la circonstance que la lumière (indépendamment de l'héliotropisme) favorise l'état de tension des tissus, tandis que dans l'obscurité les organes ont une tendance naturelle à rester dans l'état pultacé qui caractérise les parties les plus jeunes. »

Les expériences de Duhamel sur l'orientation des racines et des tiges de jeunes glands de chêne, germant au milieu d'une couche épaisse de terre, contredisent d'une façon absolue l'hypothèse de Knight, renouvelée et précisée par Hofmeister et Sachs.

Nouvelle hypothèse de Sachs : La pesanteur modifie la croissance dans les organes polarisés. — Quelques années plus tard, Sachs abandonne l'hypothèse d'Hofmeister, et, à la suite de ses recherches sur la croissance des organes qui manifestent les courbures géotropiques, il émit les idées qui sont encore acceptées aujourd'hui par un certain nombre de botanistes.

La nouvelle théorie, dont Sachs fut le promoteur, se résume dans la proposition suivante : *La pesanteur augmente la vitesse de croissance dans la région inférieure ascendante du corps, et la diminue dans la région inférieure descendante.*

Aucune preuve directe n'a été fournie pour établir cette proposition, « mais, en l'absence de preuves directes, divers indices portent à croire qu'il en est ainsi ». On ne trouve nulle part, dans les travaux originaux, l'exposé des raisons qui appuient la proposition que nous avons énoncée. Sachs, qui a publié sur cette question des mémoires qui font autorité, se borne à dire que le géotropisme est provoqué par l'allongement inégal des membranes cellulaires sur les deux faces, supérieure et inférieure, de l'organe maintenu horizontalement.

Un organe positivement géotropique comme la racine, disposé horizontalement, se recourbe en bas parce que la croissance sur la face supérieure est plus grande que lorsque cet organe est vertical, et que la croissance sur la face inférieure est moins grande.

Un organe négativement géotropique, tel qu'une tige, maintenu horizontalement, se recourbe en haut parce que la croissance sur la face inférieure est plus grande que lorsque la tige est maintenue verticalement, et que la croissance sur la face supérieure est moins grande. Sachs reconnaît que l'on ignore complètement comment la pesanteur provoque cette différence d'allongement.

Ainsi, bien qu'on n'eût aucune idée de la manière dont la pesanteur agit sur les tissus des organes polarisés, il semblait établi que son action s'exerce dans la région de croissance.

Expériences de Cieselski et de Darwin sur la sensibilité géotropique

du sommet des racines. — *Objections.* — Les observations de Cieselski ont ouvert aux recherches une voie nouvelle, en montrant que le géotropisme ne se manifeste pas dans les racines de pois, de vesce, de lentille, lorsque le sommet, dépourvu de croissance, a été coupé. En outre, lorsqu'une racine a été maintenue dans la situation horizontale pendant quelque temps sans s'être courbée, et que l'on coupe le sommet, on peut la placer dans une position quelconque, elle continue à s'incurver comme une racine intacte.

La disparition du géotropisme consécutive à l'ablation du sommet, tandis que la zone de croissance demeure intacte, démontre que la pesanteur n'agit pas directement sur cette dernière, et nous amène à considérer dans une racine deux régions : la région du sommet, sensible à l'action de la pesanteur, et la région de croissance, insensible à cette même action.

Lorsque la région terminale a perçu la sensation, elle la transmet à la région de croissance qui est excitable, quoique insensible, et les courbures géotropiques se manifestent.

Sachs, ayant répété les expériences de Cieselski, obtint des courbures dans toutes les directions, et conclut que les affirmations de cet auteur étaient erronées. Darwin, au contraire, obtint des résultats conformes à ceux que Cieselski avait annoncés, et admit que l'extrémité de la racine est seule sensible à l'action de la pesanteur.

Malgré l'autorité qui s'attache au nom de Darwin, la plupart des botanistes se rangèrent à l'avis de Sachs en niant l'existence de la sensibilité géotropique, et dans les ouvrages qui passent, avec raison, pour exposer l'état de la Science, il n'est même pas fait mention des observations de Cieselski et de Darwin !

On ne peut guère expliquer l'oubli dans lequel ces observations intéressantes sont tombées. A la vérité, elles soulèvent une objection capitale : l'ablation du sommet de la racine, comme l'ont fait Cieselski et Darwin, ou la cautérisation comme l'a pratiquée Darwin, apportaient un tel trouble dans les tissus, que la suppression du géotropisme pouvait être due, non pas à la disparition de la région uniquement sensible, mais aux désordres consécutifs à la blessure ou à la cicatrisation.

Si on observe, dans une racine maintenue horizontalement pendant quelque temps et dont le sommet a été coupé, des courbures géotropiques, cela tient sans doute à ce que l'action de la pesanteur, dans la région de croissance, a pu se manifester avant que les troubles apportés par la mutilation aient eu le temps de se transmettre dans cette région. Les courbures variées et très inégales obtenues par Sachs sembleraient justifier ces objections. D'autre part, MM. Wiessner et Molish ont montré que la décapitation modifie la croissance des racines.

Expérience de Czapek établissant l'existence d'une région sensible et d'une région excitable, mais non sensible. — Dans un travail récent, M. Czapek a vérifié d'une manière ingénieuse les résultats obtenus par Cieselski et Darwin, en s'affranchissant du trouble occasionné par la mutilation du sommet. La méthode qu'il emploie, désignée sous le nom de *Spitzenablenkung* ou méthode de la déviation du sommet, est la suivante :

Des plantules de germination sont placées sur un clinostat, de manière à équilibrer l'action de la pesanteur. D'autre part, on prépare de petits tubes en verre fermés à un bout, dont le diamètre intérieur est un peu plus grand que celui de la racine principale, et recourbés à angle droit de manière que la branche fermée et la branche ouverte aient $1^{mm},5$ ou 2 millimètres. On place l'un de ces tubes sur le clinostat, en le fixant avec un peu de cire molle de manière que l'extrémité d'une racine soit engagée dans l'ouverture d'une des branches. La racine continue à croître en s'enfonçant dans le tube et, lorsqu'elle arrive au niveau de la courbure, elle se recourbe à angle droit pour s'allonger dans la branche courbée qu'elle remplit bientôt. Il faut environ huit ou dix heures pour obtenir ce résultat, à la température de 18 ou 19°. La coiffe de verre doit être assez lâche pour être retirée facilement et pour ne pas gêner la croissance de la racine. Il n'y a pas lieu de s'occuper de son poids, car il est négligeable et ne détermine aucun trouble dans la croissance de la racine.

Les observations faites avec les racines ainsi préparées sont très intéressantes. Quand la racine est placée dans une situation horizontale, de manière que le sommet, enveloppé de sa coiffe de verre, soit dirigé verticalement en bas, on n'observe aucune courbure géotropique, la racine continue à croître dans la direction horizontale que possède la zone de croissance : cette région est donc insensible à l'excitation géotropique.

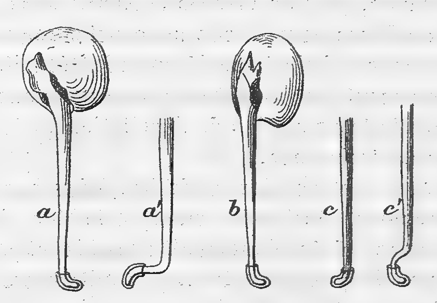


Fig. 591. — *a*, racine avant l'action de la terre ; *a'*, la même quelques heures après ; *b*, situation de la racine dans laquelle les courbures ne se manifestent pas ; *c*, situation initiale de la racine ; *c'*, la même après l'action de la terre.

On place ensuite la racine verticalement, de manière que la région de croissance occupe la situation normale, le sommet étant horizontal ; au bout de quelques heures, il se produit, dans la région de croissance, une courbure géotropique dont la convexité est dirigée du côté vers lequel le sommet était primitivement placé ; ce dernier décrit ainsi peu à peu un angle de 90°, qui le ramène dans la situation normale, où l'action de la pesanteur s'exerce également sur tous ses points.

Si la racine est placée horizontalement, mais de manière que le sommet soit dirigé en haut, on aperçoit bientôt, dans la région de croissance, une courbure destinée à replacer peu à peu le sommet dans la direction normale. M. Czapek a pu multiplier les expériences en orientant de diverses

manières les racines dont le sommet est encapsulé; le résultat a été constant : si le sommet occupe la situation normale, c'est-à-dire la pointe en bas et l'axe vertical, on n'observe pas de courbures géotropiques, quelle que soit l'orientation de la zone de croissance; mais s'il n'occupe pas cette situation, et bien que la zone de croissance soit verticale, on voit apparaître des courbures variées qui ramènent le sommet dans la situation normale.

Localisation de la sensibilité géotropique. — On voit ainsi que les faits signalés par Cieselski et Darwin sont exacts. Le sommet de la racine, sur une longueur de 1mm,5 à 2 millimètres, la coiffe non comprise, est seul géotropiquement sensible; c'est aussi la seule région qui soit polarisée vis-à-vis de la direction de la pesanteur. La zone de croissance est insensible et non polarisée, mais elle peut réagir par des courbures variées quand elle reçoit l'excitation transmise par le sommet; elle est donc excitable. On s'explique ainsi le phénomène d'induction produit par la pesanteur sur les organes qui ont été déplacés de leur direction normale.

Transmission de l'excitation. — La transmission de l'excitation du sommet sensible à la zone de croissance est mise en évidence par les expériences de Cieselski, de Darwin et de Czapek.

On place une racine intacte dans la situation horizontale pendant un temps suffisant pour que la perception soit réalisée, mais trop court pour faire apparaître la courbure consécutive; on décapite le sommet par une section bien franche et bien normale, puis on dispose la racine dans une direction verticale; au bout de quelques heures, elle se couche comme l'aurait fait une racine intacte. Le temps qui s'est écoulé entre la décapitation et l'instant où les courbures commencent à se manifester représente une partie de celui qui a été nécessaire pour la transmission de l'excitation géotropique de la région sensible à la région de croissance.

Disposition de la zone sensible et de la région excitable, mais insensible. — Dans les racines, ainsi qu'on vient de le voir, il y a une séparation complète entre la zone géotropiquement sensible et la zone excitable; la première occupe une longueur de 1mm,5 à 2 millimètres sous la coiffe, la seconde est constituée par la zone de croissance.

Dans les tiges, la localisation de ces propriétés n'est pas aussi nette. En opérant sur des plantules d'*Helianthus*, de *Linaria genistœfolia*, des tiges d'*Hippuris*, M. Czapek a trouvé que la sensibilité géotropique concorde le plus souvent avec la plus grande partie de la région de croissance : la perception et la réaction sont donc, dans les tiges, à peu près confondues.

Modifications produites par les conditions extérieures. — Si l'on place des organes sensibles à l'action de la pesanteur dans des conditions diverses, par exemple si l'on modifie la température ou si l'on supprime l'oxygène, on constate que ces influences, qui modifient la croissance, modifient aussi la faculté de réaction géotropique, c'est-à-dire la production des courbures, mais la sensibilité géotropique demeure intacte. Ainsi des plantules soustraites à l'influence de l'oxygène, mais placées dans les conditions où la pesanteur manifeste son action, ne réagissent pas tant que l'oxygène fait défaut; mais, aussitôt qu'on les replace dans les conditions ordinaires, les

courbures se produisent aussitôt sous l'influence de l'excitation perçue et transmise, alors que la plante était soustraite à l'influence de l'oxygène.

De même, la suppression des courbures géotropiques par un obstacle mécanique, notamment par l'immersion des organes dans le plâtre, n'altère pas la sensibilité géotropique, car si on les soumet pendant cette immersion à l'influence de la pesanteur, ils manifestent les courbures géotropiques dès que la gaine de plâtre est enlevée.

Détermination de la direction favorable aux plus fortes courbures. — Les recherches de Sachs, de Fr. Darwin, etc., avaient paru montrer que la situation horizontale des organes orthotropes est celle qui correspond aux plus fortes courbures. M. Czapek a cherché à vérifier ce fait, et il a montré que la grandeur de la réaction croît avec l'angle d'inclinaison que l'on donne aux organes : pour les racines, le maximum de réaction correspond à un angle de 135°; pour les entre-nœuds du seigle, le maximum correspond à un angle de 120°. L'optimum des plus fortes courbures ne correspond donc pas à la situation horizontale.

Relation entre l'intensité de la force agissante, la grandeur de la réaction, et la durée de la transmission de l'excitation géotropique. — Les recherches de Sachs, d'Elfving, de Fr. Schwarz, ont montré que la réaction géotropique augmente avec l'intensité de la force qui la provoque. M. Czapek confirme ce résultat, mais il nous fait connaître la durée de l'excitation latente, c'est-à-dire le temps qui s'écoule entre le début de l'induction et le début de la réaction. Les plantes sont placées sur un clinostat à vitesse variable capable de développer une force centrifuge dont l'intensité varie depuis $\frac{5}{10000}$ de l'accélération terrestre jusqu'à trente-huit ou quarante fois cette valeur; un dispositif spécial permet d'observer les plantes sans les retirer de l'appareil.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus :

Intensité de la force centrifuge. g représente l'accélération de la pesanteur.	Durée de l'excitation latente. Heures.
38 à 35 g	3/4
28 à 10 g	1
7 à 4 g	1 1/2
3,5 à 0,9 g	1 3/4
0,6 g	2 1/2
0,5 à 0,4 g	3
0,2 à 0,02 g	4
0,003 g	5
0,001 g	6
0,0005 g	8 Faible courbure.

Résumé. — En résumé, toutes les plantes réagissant sous l'action de la pesanteur, présentent deux régions : 1° une région sensible, mais incapable de réagir sous cette action, c'est la région de *sensibilité géotropique*; 2° une région insensible, mais excitable et capable, sous l'influence de l'excitation transmise par la région précédente, de manifester les courbures géo-

tropiques qui orientent la région sensible d'une manière déterminée; cette région possède *l'excitabilité géotropique*, quoiqu'elle soit géotropiquement insensible.

Ces deux régions, plus ou moins confondues dans les tiges, sont toujours nettement figurées dans les racines.

Les phénomènes d'orientation que la pesanteur détermine dans les organes des plantes ne sont donc pas, comme on le croyait, produits par une modification directe de la croissance, mais sont la conséquence d'une perception de la masse protoplasmique dans les cellules en voie de multiplication ou de croissance, perception qui peut se traduire ou non par des déformations, mais qui existe toujours, même dans les cas où les réactions sont impossibles à produire, quand par exemple les organes sont immergés dans le plâtre, ou bien lorsque les organes sont naturellement orientés dans la direction qu'ils doivent avoir.

L'analyse des phénomènes géotropiques ainsi ramenés à leur cause initiale, la perception dans la région géotropiquement sensible, n'a pas été poussée plus loin, et nous ignorons pourquoi la région sensible d'une tige ou d'une racine, en transmettant l'excitation qu'elle a perçue, réagit sur la zone de croissance pour y provoquer des courbures inverses.

C'est là une propriété inhérente au protoplasme dont nous nous bornons à constater l'existence.

Tout au plus pouvons-nous remarquer que le géotropisme est une propriété acquise et développée héréditairement par la sélection naturelle, en vue d'orienter les divers organes de la plante dans les directions les plus favorables à la manifestation des phénomènes de la vie. Toutes les fois, en effet, que le géotropisme devient nuisible, il disparaît ou demeure faible; comme on l'observe pour le gui, dont la graine germe, ainsi que l'on sait, dans les situations les plus diverses sur les branches des arbres, mais dont la racine principale se dirige toujours, sous l'influence d'un héliotropisme négatif énergique, dans les tissus de la plante hospitalière.

C'est là une constatation, ce n'est pas une explication.

Bonnet, *Recherches sur l'usage des feuilles*, 2e mém., 1754.
Ciesielski, *Abwartskrummung der Wurzel*. Dissert. Inaug. Breslau, 1871.
F. Czapek, Untersuchungen über Geotropismus (*Jahr. f. Wissensch. Bot.*, 1895, p. 243).
Darwin, *La faculté motrice dans les plantes* (trad. franç. par Heckel. Paris, 1882).
Duhamel, *Physique des arbres*, t. II, 1758, p. 137.
Dutrochet, *Mémoires*, t. II, 1836.
Elfving, Beiträge zur Kenntniss der Phys. Emwirkung der Schwerkraft, af die Pflanzen (*Acta Soc. sc. Tennicæ*, XII, 1880).
Hofmeister, Ueber die durch Schwerkraft bestimmten Bichtungen von Pflanzen theilen (*Bericht. der math. phys. kl. der K. Sacchs. Gesells. der Wiss.*, 1860). — *Die Lehre der Pflanzenzelle*, 1867.
Knight, *Philosophical transaction*, 1806, p. 99.
W. Pfeffer, Ueber die geotropische sensibilität der Wurzelspitze nach dem vom D. Czapek in Leipziger botanischer Institut angestellten Untersuchungen (*Berich. der math. phys. kl. d. K. Sacchs. Gesells. der Wiss. zu Leipzig*, 1894).
Rothert, *Ueber Heliotropismus.* — *Ueber die Wirkung der decapilation bei Gramineen Keimlingen*, 1895, p. 191.
Sachs, *Physiologie végétale* (trad. franç.), 1868, p. 98. — *Arbeiten der bot. Instit. in Wurzbourg*, I, 1872 ; II, 1879. — *Untersuchungen über Pflanzenphysiologie Zweite Aufläge*, 1887.

SCHWARTZ, Die Einfluss der Schwerkraft auf das Langenwächsthum der Pflanzen (*Unters. aus. d. Bot. Inst. zu Tubingen*, I, 1881).

II. — PHÉNOMÈNES PRODUITS PAR UNE PRESSION DE DURÉE VARIABLE

La production de pressions, même très faibles et de durée variable, sur divers organes des plantes, se traduit par des déformations ou par des déplacements.

Il y a lieu de distinguer deux cas :

1° Les pressions s'exercent sur un organe en voie de croissance;

2° Les pressions s'exercent sur un organe adulte, dépourvu de croissance.

1° ***Organes en voie de croissance.*** — Lorsque les pressions s'exercent sur un organe en voie de croissance, elles modifient la croissance au point où elles s'exercent, et provoquent une déformation capable de contre-balancer l'influence des autres forces extérieures.

Racines, courbures de contact. — Ainsi, chez les racines, d'après Sachs, le contact d'un corps solide détermine une courbure dite *de contact*, dans laquelle le côté concave est situé contre le corps qui provoque la modification; il en résulte que les racines s'appliquent étroitement contre les corps solides, en rampant à leur surface s'ils sont plans, en s'enroulant autour d'eux s'ils sont cylindriques.

Enroulement des vrilles. — Un certain nombre de tiges deviennent grimpantes en s'accrochant aux supports par des cordons appelés *vrilles*, ordinairement enroulés en spirale. Quelle que soit la nature morphologique des vrilles, que ce soient des rameaux (vigne) ou des feuilles (gesse), le mode d'enroulement est le même et nous présente un nouvel exemple de la modification apportée par les pressions à la croissance de ces cordons.

Quand les vrilles sont encore jeunes, leur croissance est uniforme ; elles sont rectilignes et se dirigent en divers sens autour de la tige qui les porte ; mais, comme elles présentent des mouvements réguliers, pendant que la tige accomplit une circumnutation, elles sont amenées, en explorant ainsi les divers points de l'espace, à toucher les supports. Comme elles sont très sensibles à la pression, le choc, même de peu de durée, contre un obstacle modifie la croissance au point où elle s'exerce, et la vrille se courbe comme tout à l'heure la racine en devenant concave au point excité, elle ne tarde pas à former autour du support, s'il est assez large, un certain nombre de tours, et la vrille est fixée. Ces phénomènes se produisent à l'obscurité comme à la lumière, pourvu que l'optimum de croissance soit réalisé.

La sensibilité des vrilles à la pression est telle qu'il suffit d'une pression de 1 milligramme pendant vingt-cinq secondes pour provoquer la courbure des vrilles de la passiflore.

Ces phénomènes ne s'observent que pendant la période terminale de la croissance; lorsque celle-ci est achevée, le mouvement des vrilles, ainsi que la sensibilité à la pression, disparaissent.

La sensibilité à la pression peut se manifester chez la vigne vierge par des déformations différentes ; en effet, sous l'influence d'un héliotropisme

négatif très prononcé, les vrilles se dirigent vers les obstacles ombragés et, lorsqu'elles arrivent au contact de ceux-ci, elles s'élargissent en une pelote très adhérente.

2° ***Pressions ou chocs exercés sur des organes adultes.*** — *Mouvements provoqués. — Dionée. — Diosera.* — Tandis que la sensibilité à la pression est abolie dans les vrilles et les racines dès que la croissance est achevée, elle peut se maintenir et même s'exalter chez certaines feuilles très irritables, telles que la dionée attrape-mouches (*Dionea muscipula*) et le rossolis (*Diosera*). Dans la dionée, les feuilles sont formées par un limbe bilobé dont les deux moitiés ont les bords munis de segments rigides et sont séparées par la nervure médiane formant la charnière autour de laquelle chaque moitié peut tourner de manière à se rapprocher de sa voisine en engrenant l'un dans l'autre les segments marginaux.

Lorsque la feuille est soustraite à toute irritation mécanique, les deux lobes du limbe sont inclinés l'un sur l'autre à angle droit ; on remarque, sur la face interne de ces lobes, des poils de deux sortes : les uns, peu nombreux (trois sur chaque lobe), sont assez longs et effilés; les autres, très nombreux, courts et arrondis, de couleur pourpre, sécrètent un liquide mucilagineux.

Ce sont les trois poils effilés hérissant le milieu de chaque lobe, qui sont seuls sensibles. Si l'on vient à les irriter par un léger contact, et il suffit pour cela du frôlement produit par un insecte de petite taille, l'irritation se transmet aussitôt dans toute la feuille et les deux lobes tournant autour de la charnière s'appliquent l'un contre l'autre en emprisonnant l'insecte. Celui-ci, par les efforts répétés qu'il fait pour s'évader du piège ainsi fermé, renouvelle l'excitation mécanique qui maintient la feuille repliée ; il ne tarde pas à être englué par le liquide des poils fins qui tapissent la feuille, et meurt bientôt.

L'irritabilité se manifeste aussi à peu près de la même manière chez les feuilles de *Diosera*. Les feuilles de ces plantes portent sur toute la face supérieure une série de segments semblables à des poils, terminés par une partie un peu plus renflée, rouge, sécrétant un liquide visqueux. Sous l'influence de l'irritation produite par le contact des particules solides ou d'un insecte englué par la sécrétion visqueuse, les segments s'inclinent et se recourbent vers la partie irritée, puis souvent la moitié du limbe se replie sur la région excitée.

Quand l'irritation est produite par un insecte, les divers mouvements consécutifs à cette irritation capturant l'insecte, celui-ci meurt et ses tissus sont dissous et absorbés par la feuille.

Mouvement des feuilles de la sensitive. — La feuille de la sensitive (*Mimosa pudica*) est composée-bipennée; elle est formée de deux paires de pétioles secondaires portés par un pétiole primaire, et pourvus chacun de quinze à vingt paires de folioles. A la base des pétioles et des folioles, il existe des renflements particuliers, lisses dans les folioles, mais munis de poils à leur face inférieure dans les pétioles.

Si l'on détermine dans la plante un ébranlement assez fort, les pétioles se courbent au niveau des renflements, le pétiole primaire s'affaisse, les pétioles

secondaires et les folioles se rapprochent et se ferment; toute la plante prend la position nocturne. Au lieu d'ébranler la plante par un choc, on peut produire une excitation locale en touchant légèrement les poils qui hérissent la face inférieure des renflements, ou en effleurant la surface lisse des renflements des folioles : la foliole ou le pétiole correspondant se replie.

L'excitation locale ainsi produite se propage peu à peu vers les points voisins dans les deux directions, et au bout d'un certain temps toutes les feuilles ont pris la position nocturne.

La plante ne tarde pas d'ailleurs à reprendre peu à peu son aspect primitif, par un mouvement en sens inverse des pétioles et de la base des folioles.

On voit déjà que, dans la sensitive, les renflements de la base des pétioles ou des folioles sont excitables; c'est pour cela qu'on les nomme renflements moteurs, puisque l'excitation même faible développée en un point se propage peu à peu dans toute la plante. Dans chaque renflement moteur, le siège de l'excitation est dans la face inférieure, car l'ablation de cette région seule supprime la sensibilité. La transmission de l'excitation a lieu par les nervures, et non par le parenchyme.

Lorsqu'on étudie le mécanisme de l'excitation, on voit qu'à la suite de l'excitation les cellules de la moitié inférieure du renflement expulsent de l'eau qui se rend partie dans les espaces intercellulaires, partie dans la région supérieure; les tissus de la région excitée deviennent flasques et le pétiole s'abaisse. Peu à peu, les cellules du renflement moteur reprennent l'eau qu'elles avaient expulsée, la turgescence augmente et le pétiole se relève.

L'irritabilité que présentent les renflements moteurs de la sensitive, de même que les mouvements provoqués dans d'autres plantes par un choc, sont momentanément abolis par les anesthésiques, vapeur d'éther ou de chloroforme.

Les explications proposées jusqu'ici pour expliquer les mouvements provoqués, ne sont pas satisfaisantes, et leur discussion n'entre pas dans le cadre de cet article.

BERT, Recherches sur les mouvements de la sensitive (*Mém. de la Soc. des sc. phys. et nat. de Bordeaux*, 1re série, 1868 ; 2e série, 1870 ; *Comptes rendus*, t. LXXXVIII, 1870.)

MILLARDEL, *Études sur les mouvements périodiques et paratoniques de la sensitive*. Thèse de Strasbourg, 1869.

BUCKE, Ueber die Bewegung der *Mimosa pudica* (*Muller's Arch. f. Anat.*, 1848, p. 234; *Sitzungsb. d. Akad. d. Wiss. z. Wien*, 1864, p. 4).

DARWIN, *Les plantes insectivores* (trad. franç., 1877).

CANDOLLE (CASIMIR DE), Sur la structure et les mouvements des feuilles du *Dionœa muscipula* (*Arch. des sc. phys. et nat. de Genève*. 1876, p. 55).

MUNK (HERM), *Die electrischen und Bewegungs Erscheinungen am Blatte der Dionœa muscipula*. Leipzig, 1876.

W. PFEFFER, Ueber Fortpflanzung der Reizes bei *Mimosa pudica* (*Jahr. f. Wiss. Bot.*, IX, 1874).

H. DE VRIES, Zur Mecanik der Bewegungen der Schlengpflanzen (*Arb. de Bot. Inst. Wurzbourg*, 1873, Heft 3).

DARWIN, On the movements and habits of climbing plants (*J. of th. Linnean Soc. Bot.*, III, London, 1865).

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME PREMIER

Des erreurs dans les mesures, par M. G. Weiss........ 1
Principes généraux de mécanique, par M. G. Weiss........ 8
Le repos et le mouvement........ 8
Cinématique........ 9
Statique........ 23
Dynamique........ 29
Propriétés des solides, par M. Gariel........ 49
Résistance des matériaux, par M. Gariel........ 55
Architecture des os, par M. Gariel........ 85
Architecture des muscles, par M. G. Weiss........ 90
Principes généraux de méthode graphique, par M. G. Weiss........ 99
La contraction musculaire, par M. G. Weiss........ 124
Locomotion humaine, par M. Paul Richer........ 137
I. *Physiologie du muscle sur le vivant*........ 137
A. De la forme du muscle sur le vivant........ 137
B. Les divers états physiologiques du muscle........ 138
C. Caractères morphologiques des différents états physiologiques du muscle........ 144
D. Contraction musculaire physiologique........ 147
II. *De la station*........ 160
A. Station verticale droite ou symétrique........ 161
B. Station sur la pointe des pieds........ 169
C. Station verticale hanchée ou asymétrique........ 171
D. Station à genoux........ 174
E. Station assise........ 174
F. Pathologie de la station........ 175
III. *De la locomotion proprement dite*........ 178
Description des mouvements de la locomotion ou cinématique........ 186
a. Du pas........ 186
b. Des mouvements des différentes parties du corps dans la marche. 190
c. Description des mouvements de la course........ 196
d. Du rôle des muscles dans la locomotion........ 199
e. De quelques variétés de la marche et de la course........ 205
f. Sauts divers........ 220
Dynamique de la locomotion........ 224
La locomotion animale, par M. Marey........ 229
Locomotion terrestre........ 229
Locomotion des quadrupèdes........ 229
Locomotion des reptiles........ 246

Locomotion aquatique 250
Locomotion aérienne 260
Vol des insectes 260
Vol des oiseaux 272

Principes généraux d'hydrostatique et d'hydrodynamique, par M. WEISS 288
Hydrostatique 288
Hydrodynamique 290

Cœur. — Cardiographie, par M. WERTHEIMER 301
I. *Mouvements du cœur pendant une révolution cardiaque* 302
II. *Variation de pression dans les cavités du cœur. — Cardiographie manométrique* 310
III. *Signes extérieurs de la fonction du cœur* 323
IV. *Variations de volume du cœur. — Cardiographie volumétrique. — Phénomènes cardio-pneumatiques. — Pulsation négative* 340
V. *Force, débit, travail du cœur* 344

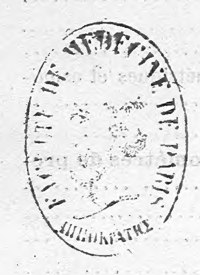
Circulation du sang dans les vaisseaux. — Pression et vitesse, pouls et sphygmographie, par M. E. MEYER 355
CHAPITRE PREMIER. — *Notions générales* 355
CHAP. II. — *Circulation artérielle* 360
A. Propriétés des artères 360
B. Conditions mécaniques de la circulation artérielle 366
CHAP. III. — *Pression artérielle* 367
A. Moyens d'étude 367
B. Établissement de la pression artérielle 374
C. Caractères graphiques des courbes de pression 377
D. Variations de la pression artérielle 381
CHAP. IV. — *Vitesse du sang dans les artères* 384
A. Généralités 384
B. Moyens d'étude 385
C. Caractères graphiques 386
CHAP. V. — *Pouls et sphygmographie* 388
A. Généralités 388
B. Mouvements ondulatoires dans les liquides 389
C. Moyens d'études 391
D. Caractères graphiques du pouls. Sphygmogrammes 394
E. Retard du pouls sur la pulsation cardiaque. Vitesse de propagation de l'onde pulsatile 395
F. Rapports du pouls avec la circulation artérielle 396
CHAP. VI. — *Mouvement du sang dans les veines* 398
A. Généralités 398
B. Pression veineuse. Pouls veineux 401

Pléthysmographie, par M. HALLION 405
I. *Pléthysmographie appliquée aux membres de l'homme* 408
II. *Pléthysmographie chez l'animal* 413

Capillarité et tension superficielle, par M. A. IMBERT 422
Solubilité des solides. — Imbibition, par M. A. IMBERT 444
Filtration, par M. GARIEL 450
Osmose, par M. A. DASTRE 466
Introduction 466
CHAPITRE PREMIER. — *Étude expérimentale des phénomènes osmotiques* 470
I. Premières études expérimentales de l'osmose 470
II. Membranes osmotiques 478
a. Cloisons naturelles 483
b. Cloisons artificielles 492

III. Résultats des mesures osmotiques directes. — Valeurs numériques. — Lois de l'osmose.... 511
IV. Méthode physiologique. — Déterminations osmométriques comparatives de De Vries. — Plasmolyse. — Isotonie.... 520
CHAP. II. — *Étude théorique de l'osmose*.... 536
I. Solution des substances organiques, non électrolytes.... 537
II. Solution des substances électrolytes.... 556
III. Tableaux des données osmotiques obtenues par déterminations expérimentales directes.... 565
CHAP. III. — *Déterminations indirectes de la pression osmotique*.... 571
I. Tension de vapeur des dissolutions. — Tonométrie.... 573
a. Dissolutions véritables.... 573
b. Pseudo-dissolutions. — Solutions salines.... 600
II. Cryoscopie. — Point de congélation des solutions.... 612
a. Dissolutions véritables.... 613
b. Pseudo-solutions. — Solutions salines.... 648
III. Relations entre les mesures cryoscopiques, tonométriques et osmotiques.... 679
Propriétés des gaz, par M. J. TISSOT.... 687
Analyse des gaz, analyse sur la cuve à mercure, eudiomètres de précision, par M. J. TISSOT.... 700
Analyse sur la cuve à mercure.... 700
Eudiomètres de précision.... 709
Gaz du sang, par M. J. TISSOT.... 724
Phénomènes physiques de la respiration, par M. J. TISSOT.... 738
Principes généraux de la chaleur, par M. WEISS.... 756
Thermométrie, par M. GARIEL.... 765
Température, par M. J.-P. LANGLOIS.... 780
Calorimétrie, par M. C. SIGALAS.... 804
I. Calorimétrie physique.... 806
II. Calorimétrie chimique.... 811
III. Calorimétrie biologique.... 816
Étuves et régulateurs de température, par M. C. SIGALAS.... 844
Étuves.... 845
Régulateurs de température.... 865
Chaleur animale, par M. F. LAULANIÉ.... 872
CHAPITRE PREMIER — De la production de la chaleur envisagée comme phénomène universel chez les êtres vivants.... 872
CHAP. II. — Raison générale de la combustion effectuée et de la chaleur produite par les tissus vivants. — Matériaux de la combustion.... 874
CHAP. III. — Sources de la chaleur animale.... 878
CHAP. IV. — Intensité de la thermogenèse.... 912
CHAP. V. — Variation de la thermogenèse.... 916
CHAP. VI. — Fixité relative de la température centrale. Limites et lois de ces variations physiologiques.... 932
CHAP. VII. — Régulation de la température. — Résistance à la chaleur et au froid. — Mécanisme de cette résistance.... 936
CHAP. VIII. — De la chaleur considérée comme condition externe des phénomènes de la vie.... 952
CHAP. IX. — Influence du système nerveux sur la calorification.... 964
CHAP. X. — Troubles de la régulation.... 973
Travail fourni par les animaux, rendement des moteurs animés, par M. GARIEL.... 982
Propagation de la chaleur, protection des animaux, par M. GARIEL.... 1012

Influence de la pression sur la vie, par MM. P. Regnard et P. Portier..... 1029
I. Préliminaires..... 1029
II. Action mécanique de la pression..... 1034
Influence des agents atmosphériques sur les éléments cellulaires, par M. A. Charrin..... 1099
Actions hygrométriques sur les végétaux, par M. Mangin..... 1118
Influence de la chaleur sur les végétaux, par M. Mangin..... 1124
Actions mécaniques sur les végétaux, par M. Mangin..... 1132
I. Action de la pesanteur..... 1132
II. Phénomènes produits par une pression de durée variable..... 1143



FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

455-98. — Corbeil. Imprimerie Éd. Crété.